Запорізький національний технічний університет

НОВІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

2’2006

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВИХОДИТЬ ДВІЧІ НА РІК

Зареєстрований 29 січня 2003 року Державним комітетом інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України.
Свідоцтво – серія КВ № 6906.
Засновник та видавець: Запорізький національний технічний університет

Запоріжжя, ЗНТУ
2006

ISSN 1607-6885

Журнал “Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні” видається з 1997 року. Він входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук.

Науковий журнал друкує оригінальні та оглядові статті науковців ВНЗ і установ України та інших країн відповідно до рубрик:

- теорія будови та структурних змін у металах, сплавах та композитах. Вплив термічної, хіміко-термічної та термомеханічної обробки на характер структури і фізико-механічні властивості матеріалів;
- конструкційні та функціональні матеріали. Механічні властивості сталей, сплавів та композитів. Технологічне забезпечення надійності та довговічності деталей енергетичних установок. Методи механічного оброблення. Технології зміцнювальних обробок. Характеристики поверхневих шарів та захисних покриттів деталей машин і виробів;
- металургійне виробництво. Теплофізика та теплоенергетика. Ресурсозберігальні технології. Порошкова металургія. Промтранспорт. Раціональне використання металів;
- механізація, автоматизація та роботизація. Вдосконалення методів дослідження та контролю якості металів. Моделювання процесів у металургії та машинобудуванні.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор д-р техн. наук, проф. С. Б. Бєліков (ЗНТУ), Україна
Заступники гол. редактора: д-р техн. наук, проф. В. Ю. Ольшанецький (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф. Ю. М. Внуков (ЗНТУ), Україна

Члени редколегії:

д-р техн. наук, проф. А. Д. Коваль (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф. В. В. Луньов (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф. І. П. Волчок (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф. В. С. Попов (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф. Б. П. Середа (ЗДІА), Україна
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Терентьєв (МДТУ), Росія
д-р техн. наук, проф. С. Т. Мілейко(ІФТТ), Росія
д-р техн. наук, проф. К. Шикуа (Франція)
д-р техн. наук, проф. В. О. Богуслаєв (“Мотор Січ”), Україна
д-р техн. наук, проф. В. В. Аверін (ІММ) Росія
д-р техн. наук, проф. Б. Б. Винокур (США)
д-р техн. наук, проф. А. Л. Геллер (Німеччина)
д-р техн. наук, проф. В. І. Мазур (НМетАУ) Україна
д-р фіз.-мат. наук, проф. С. В. Лоскутов (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф. О. С. Комаров (Бєларусь)
д-р фіз.-мат. наук, проф. Ж. Бюлябуа (Німеччина)
д-р техн. наук, проф. Ж. Прадо (Франція)
д-р техн. наук, проф. Я. Кундрак (Угорщина)
д-р фіз.-мат. наук, проф. В. І. Пожуєв (ЗДІА), Україна
д-р техн. наук, проф. Х. Тубілевич (Польща)
д-р техн. наук, проф. Я. Гловня (Польща)
д-р техн. наук, проф. А. Федоришин (Польща)
д-р техн. наук, проф. Р. Поркар (Франція)
д-р техн. наук, проф. М. І. Гасик (НМетАУ), Україна
д-р техн. наук, проф. Е. І. Цивірко (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф А. Ш. Асатурян (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф. Ю. Ф. Терновой (УкрНДІспецсталь), Україна
д-р техн. наук, проф. Л. Й. Івщенко (ЗНТУ), Україна
д-р техн. наук, проф. А. Б. Ройтман (Україна)

Редакційно-видавнича рада:

С. Б. Бєліков, В. Ю. Ольшанецький, Ю. М. Внуков, К. С. Бондарчук, Н. М. Кобзар, В. К. Єршова, Т. О. Сокол, М. Л. М’ясников, Л. Ф. Богданова

Рукописи надісланих статей проходять додаткове незалежне рецензування з залученням провідних фахівців України та інших країн, за результатами якого редакційна колегія приймає рішення щодо можливості їх опублікування. Рукописи не повертаються.

Адреса редакції: 69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, тел.: (0612) 64 - 25 - 06, 64 - 21 - 41.

Рекомендовано до видання вченою радою Запорізького національного технічного університету, протокол № 2 від 30 жовтня 2006 року.

Журнал набраний та зверстаний у редакційно-видавничому відділі Запорізького національного технічного університету.

Комп’ютерний дизайн та верстка Н. О. Савчук
Коректори: Н. М. Кобзар, В. К. Єршова, К. С. Бондарчук, Я. О. Мамойко

© Запорізький національний технічний університет, 2006

Журнал “Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении” издается с 1997 года. Он входит в список научных профессиональных изданий Украины, в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на получение научных степеней доктора и кандидата технических наук.

Научный журнал печатает оригинальные статьи научных работников вузов и организаций Украины и других стран в соответствии с рубриками:

- теория строения и структурных изменений в металлах, сплавах и композитах. Влияние термической, химико-термической и термомеханической обработки на характер структуры и физико-механические свойства материалов;
- конструкционные и функциональные материалы. Механические свойства сталей, сплавов и композитов. Технологическое обеспечение надежности и долговечности деталей энергетических установок. Методы механической обработки. Технологии упрочняющих обработок. Характеристики поверхностных слоев и защитных покрытий деталей машин и изделий;
- металлургическое производство. Теплофизика и теплоэнергетика. Ресурсосберегающие технологии. Порошковая металлургия. Промтранспорт. Рациональное использование металлов;
- механизация, автоматизация и роботизация. Усовершенствование методов исследования и контроля качества металлов. Моделирование процессов в металлургии и машиностроении.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор д-р техн. наук, проф. С. Б. Беликов (ЗНТУ), Украина
Заместители главного редактора: д-р техн. наук, проф. В. Е. Ольшанецкий (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. Ю. Н. Внуков (ЗНТУ), Украина

Члены редколлегии:

д-р техн. наук, проф. А. Д. Коваль (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. В. В. Лунев (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. И. П. Волчок (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. В. С. Попов (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. Б. П. Середа (ЗГИА), Украина
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Терентьев (МГТУ), Россия
д-р техн. наук, проф. С. Т. Милейко (ИФТТ), Россия
д-р техн. наук, проф. К. Шикуа, (Франция)
д-р техн. наук, проф. В. А. Богуслаев (“Мотор Сич”), Украина
д-р техн. наук, проф. В. В. Аверин (ИММ), Россия
д-р техн. наук, проф. Б. Б. Винокур (США)
д-р техн. наук, проф. А. Л. Геллер (Германия)
д-р техн. наук, проф. В. И. Мазур, (НМетАУ), Украина
д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Лоскутов (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. О. С. Комаров (Беларусь)
д-р физ.-мат. наук, проф. Ж. Бюлябуа (Германия)
д-р техн. наук, проф. Ж. Прадо (Франция)
д-р техн. наук, проф. Я. Кундрак (Венгрия)
д.физ.-мат наук, проф. В. И. Пожуев (ЗГИА), Украина
д-р техн. наук, проф. Х. Тубилевич (Польша)
д-р техн. наук, проф. Я. Гловня (Польша)
д-р техн. наук, проф. А. Федоришин (Польша)
д-р техн. наук, проф. Р. Поркар (Франция)
д-р техн. наук, проф. М. И. Гасик (НМетАУ), Украина
д-р техн. наук, проф. Э. И. Цивирко (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. А.Ш. Асатурян (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. Ю. Ф. Терновой (УкрНИИспецсталь), Украина
д-р техн. наук, проф. Л. И. Ивщенко (ЗНТУ), Украина
д-р техн. наук, проф. А. Б. Ройтман (Украина)

Редакционно-издательский совет:

С. Б. Беликов, В. Е. Ольшанецкий, Ю. Н. Внуков, Е. С. Бондарчук, Н. Н. Кобзарь, В. К. Ершова, Т. А. Сокол, Н. Л. Мясников, Л. Ф. Богданова

Рукописи присланных статей проходят дополнительное независимое рецензирование с привлечением ведущих специалистов Украины и других стран, по результатам которого редакционная коллегия принимает решения о возможности их опубликования. Рукописи не возвращаются.

Адрес редакции: 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел.: (0612) 64 - 25 - 06, 64 - 21 - 41.

Рекомендовано к изданию ученым советом Запорожского национального технического университета, протокол № 2 от 30 октября 2006 года.

Журнал набран и сверстан в редакционно-издательском отделе Запорожского национального технического университета.

Компьютерный дизайн и верстка Н. А. Савчук
Корректоры: Н. Н. Кобзарь , В. К. Ершова, Е. С. Бондарчук, Я. А. Мамойко

До відома авторів

Журнал "Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні" занесено до переліку наукових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття вчених ступенів доктора і кандидата технічних наук. **Передплатний індекс журналу за каталогом Укрпошти 23721**.

Журнал видається двічі на рік.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ

Статті приймаються підготовленими в редакторі Word for Windows (v.6 і вище).

Параметри сторінки:

- розмір сторінки – А4 (210×297);
- орієнтація – книжна;
- шрифт – Times New Roman Cyr, розмір - 12pt;
- міжрядковий інтервал – 1,5;
- поля – 20мм.

Структура статті

Послідовність розміщення матеріалу статті: індекс УДК, прізвище та ініціали автора(ів), науковий ступінь, повна назва установи, в якій працює автор, місто, назва статті, анотація трьома мовами: російською, українською та англійською, текст статті, перелік посилань. Рукопис статті має бути підписаний усіма авторами. Наявність анотації обов'язкова.

Розмір статті – до 0,5 авторського аркуша.

Текст статті: приймаються статті російською, українською і англійською мовами.

До розгляду приймаються наукові статті, що містять такі необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді і її зв'язок з найважливішими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких є передумови розв'язання цієї проблеми і на якій ґрунтується автор, виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання мети статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням результатів; висновки з цього дослідження і перспективи подальших розробок у такому ж напрямку.

У статті необхідно уникати зайвої деталізації, проміжних формул і висновків, громіздких математичних виражень; не слід наводити відомі факти, повторювати зміст таблиць та ілюстрацій у тексті. Текст статті не повинен мати рукописних виправлень і позначок.

Відповідно до вимог ВАКу України щодо фахових видань, кожна стаття (крім коротких повідомлень) повинна включати розділи з такими назвами:

1. Вступ
2. Матеріали та методика досліджень
3. Теорія та аналіз отриманих результатів
4. Висновки

(а також див. "Вимоги до структурних елементів тексту статті" наприкінці журналу).

Анотація

Обсяг анотації не повинен перевищувати 40 слів.

Ілюстрації

Ілюстрації подають на окремих аркушах та в окремих файлах (формат .TIF з роздільною здатністю не менше 200 dpi, двоколірні або напівколірні (у градаціях сірого), .PCX, .BMP). Ілюстрації нумерують та підписують унизу. Якщо ілюстрації вставлено у документ Word, подаються окремі файли з ними. Мінімальний розмір фотографій 6×5 см.

ВИКОНАННЯ ІЛЮСТРАЦІЙ РЕДАКТОРОМ MICROSOFT WORD (А ТАКОЖ ІНШИМИ РЕДАКТОРАМИ) ТА ВСТАВКА ЇХ БЕЗПОСЕРЕДНЬО В ТЕКСТ СТАТТІ НЕ ДОЗВОЛЯЄТЬСЯ.

Таблиці

Таблиці мають бути розраховані на ширину колонки (8,5 см) або на ширину сторінки. Таблиці повинні містити лише необхідну інформацію.

Формули

Формули виконуються за допомогою вбудованого у Word for Windows редактора Microsoft Equation. Їх нумерують у дужках справа:

$$Z(\Theta_{\sim}) = 10\log\left(\frac{\bar{y}^2}{s^2}\right) \qquad (3)$$

Бажано, щоб ширина формули не перевищувала 8 см. Формули більшого розміру записують декількома рядками.

Перелік посилань

Перелік посилань у кінці рукопису подається мовою оригіналу згідно з послідовністю посилання в тексті статті та вимогами відповідного ДСТу. Посилання на літературу в тексті позначаються цифрою в квадратних дужках.

У довідці про авторів необхідно вказати прізвища, імена та по батькові (повністю), місце роботи, посади, вчений ступінь, адресу, номери телефонів, e-mail. Необхідно зазначити, з ким вести переговори в разі необхідності.

До редакції журналу слід подати:

1. Роздруковану статтю у 2-х примірниках;
2. Експертний висновок про можливість опублікування;
3. Довідку про авторів;
4. Рецензію на статтю;
5. Диск CD-RW з текстом статті і файлами ілюстрацій або фірмову дискету 3,5' (у випадку відсутності складних рисунків). Файли з текстом статті та довідку про авторів можна висилати електронною поштою у вигляді архівних (ZIP, RAR – архіватором) файлів. Файл статті називати прізвищем автора латинськими літерами.

Гонорар авторам не сплачується, рукописи, дискети, коректура та відбитки статей авторам не надсилаються. Редакція залишає за собою право на скорочення тексту статті без повідомлення авторові.

СТАТТІ, ЯКІ НЕ ВІДПОВІДАЮТЬ ВКАЗАНИМ ВИМОГАМ, НЕ РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ.

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, редакція журналу.
Тел.: (061) 769-82-96 – редакційно-видавничий відділ. **E-mail:** rvv@zntu.edu.ua

ЗМІСТ

I СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Ольшанецкий В.Е.
О МИГРАЦИИ МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ ОБЩЕГО ТИПА
2. Законы роста двумерных и трехмерных моделей зеренной структуры 8

Воденников С.А.
ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ И МЕХАНИЗМА СПЛАВООБРАЗОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ПРЕССОВОК С АЛЮМИНИЕМ 19

Жавжаров Є.Л., Бялік Г.А., Матюшин В.М.
МОДИФІКАЦІЯ ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК ПІД ДІЄЮ АТОМІВ ВОДНЮ 23

Вишняков Л.Р., Мороз В.П., Синайский Б.Н., Яременко О.П., Коханый В.А., Варченко В.Т.
СТРУКТУРА И НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ МУЛЛИТА И АРМИРОВАННЫХ ИМИ КОМПОЗИТОВ С АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ 27

Наумик В.В.
ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК И СЛИТКОВ В ВАКУУМЕ 32

II КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Буря А.И., Козлов Г.В.
ФРАКТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРУГОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ НАГРУЖЕНИЯ 35

Шаповалова О.М., Калинин А.В.
ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА МОДИФИКАТОРАМИ-РАСКИСЛИТЕЛЯМИ НА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КРЕМНЕМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ 38

III ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вишняков Л.Р., Синайский Б.Н., Мороз В.П., Косыгин Э.П., Нешпор А.В., Чижаньков Е.Ю., Варченко В.Т.
ПОЛУЧЕНИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИЛИЦИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА 41

Капуткин Д.Е.
КРИТЕРИЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ФОРМЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ 45

Лысенко Н.А., Клочихин В.В., Богуслаев А.В., Цивирко Э.И.
УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ШИХТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ ВОЗВРАТНЫХ ОТХОДОВ СПЛАВА ЖСЗЛС-ВИ 48

Носенко М.І., Павлов В.О.
ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ ПОРОШКОВИХ ЗАГОТОВОК 51

Пелых С.Г., Пономаренко О.И.
ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ 55

Брыков М.Н., Андрущенко М.И., Куликовский Р.А.
ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ 59

Шаломеев В.А., Лысенко Н.А., Клочихин В.В., Цивирко Э.И.
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАФИНИРОВАНИЯ ПЕЧНЫХ ДОННЫХ ОСТАТКОВ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ-5 62

Середа Б.П., Палехова И.В.
ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СВС-ТЕХНОЛОГИИ 66

IV МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

Пожуєв В.І., Прасад Ф.В.
РОЗВ'ЯЗАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ НЕОДНОРІДНИХ ОБОЛОНОК З ПІДКРІПЛЕНИМИ ОТВОРАМИ 70

Дубровин В.И., Клименко В.А., Руднев А.М.
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МОСТОВЫХ КРАНОВ 74

Попов С.Н., Антонюк Д.А.
ВЛИЯНИЕ ТРИБОМАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ РЕЗЦОВ ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ В УСЛОВИЯХ ИЗНАШИВАНИЯ ЗАКРЕПЛЕННЫМ АБРАЗИВОМ 77

Нечаев Г.И., Камель Г.И., Яковлева А.Г.
КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОЙ ВАРКИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ 85

Зиновкин В.В., Карпенко В.В., Волкова О.Г.
МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПЛАВЛЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ 89

Шишканова Г.А.
РОЗРАХУНОК КОНТАКТНОГО ТИСКУ ПІД ПРЯМОКУТНИМИ ШТАМПАМИ З УРАХУВАННЯМ ТЕРТЯ 94

Козуб Г.А.
НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ 98

V МЕХАНІЗАЦІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТИЗАЦІЯ

Омельченко А.Д., Бабушкин Г.Ф.
ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА, СОЗДАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫХ МАГНИТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ 101

Артюх О.М.
НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 106

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ІНФОРМАЦІЯ

Лавренко А.С., Варинская Л.А.
УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ 109

Вишняков Л.Р., Коханая И.Н., Коханый В.А., Андриенко О.М.
РАЗРАБОТКА ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ 110

Ружин А.А., Асатурян А.Ш.
ПОЛУЧЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ 112

Геллер А.Л., Горелик В.С.
ЕЖЕГОДНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ В ДЮССЕЛЬДОРФЕ “СТАЛЬ-2006” 115

I СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 669.24:620.183

Д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий

Национальный технический университет, г. Запорожье

О МИГРАЦИИ МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ ОБЩЕГО ТИПА

2. Законы роста и их эволюция для двумерных и трехмерных моделей зеренной структуры

Теоретически обосновывается и подтверждается поведением высокочистых однокомпонентных и бинарных металлических систем существование универсальных законов роста логарифмического (экспоненциального) типа, которые при определенных условиях реализации процесса миграции границ зерен (ячеек) трансформируются в известные степенные законы.

Данная работа представляет собой продолжение обсуждения теоретических вопросов, связанных с моделями зерен (ячеек) в двумерном и трехмерном пространстве [1], миграцией границ в однофазных системах.

Сначала рассмотрим математические модели микроскопического роста зерен (ячеек) с двукратно и противоположно искривленными граничными сегментами, а также эволюцию топологических дефектов структуры и законов роста зерен (ячеек) при постепенном "выравнивании" их линейных размеров.

Примем в качестве объектов рассмотрения следующие модели двумерной и объемной структур, удовлетворительно согласующиеся с принципами минимума зернограничной энергии и плотного заполнения определенного пространства (принцип минимума энергии свободных поверхностей).

Пусть модель фрагмента двумерной структуры представляет собой конгломерат ячеек в форме тетрагонов (внешний слой) или трапеций (переходный слой – "ожерелье"), окружающих относительно большую (многосегментную) ячейку в форме фигуры с двумя осями симметрии (типа эллипса) (рис. 1), которую будем рассматривать в качестве топологического дефекта, способного в результате своего роста к постепенному видоизменению, а, в конечном итоге – и к самоустранению. Кстати, реальным аналогом такой структуры являются часто наблюдаемые исследователями при изучении субструктуры металлов тетрагональные дислокационные сетки.

Если относительно большие топологические дефекты эллипсного типа распределены в двумерном пространстве статистически равномерно, то в процессе гипотетической миграции граничных сегментов с участием механизма переключения их с одних точек закрепления на другие [2] мелкие ячейки постепенно исчезают, а сами дефекты, видоизменяясь, объединяются в новый метастабильный конгломерат изомерных ячеек (скажем, тех же, но более крупных, чем прежде, плоских ячеек тетрагонального типа), который со временем в результате различных локальных нарушений топологического характера рождает в своей среде новые дефектные ячейки с большим (меньшим) числом сторон, чем четыре (или же равным четырем, но отличающихся в этом случае искривленностью всех своих сегментов (рис. 2)). Исключительно большие (многосегментные) эллипсные ячейки в процессе своего роста иногда преобразуются в слои пластинчатой формы с неискривленными граничными фронтами; эти пластины способны расти, увеличивая свою толщину, как в

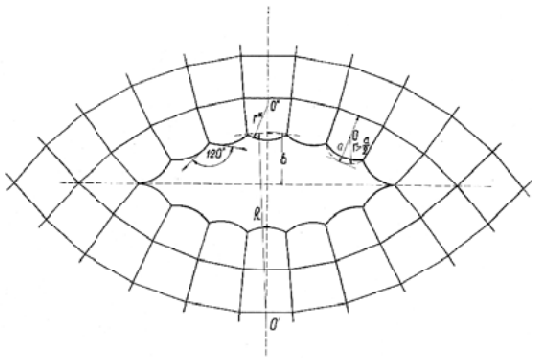


Рис. 1. Фрагмент теоретической модели двумерной зеренной (ячеистой) структуры с топологическим дефектом в виде многосегментной ячейки эллипсного типа (тройные стыки в области искривленного граничного фронта сбалансированы по натяжениям)

© В. Е. Ольшанецкий, 2006

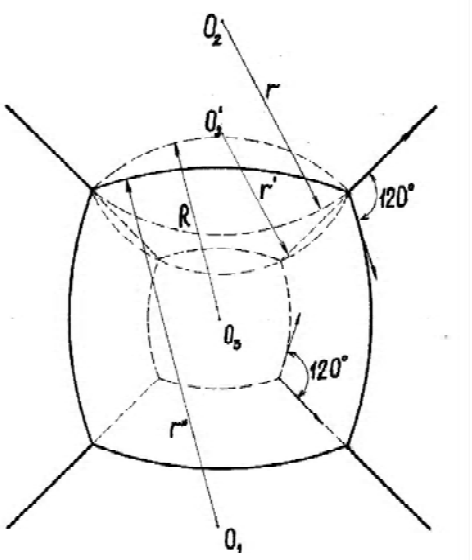


Рис. 2. Топологический дефект в виде криволинейного тетрагона со сбалансированными по натяжениям тройными стыками (углы по 120 °)

стационарном, так и нестационарном режимах [3].

Основу же объемной (трехмерной) модели составляют зерна, имеющие форму стандартных гексаэдров или гексаэдров с гранями ромбо-додекаэдра (т.е. куба со срезанными ребрами). Естественно, что такая модель должна включать в себя топологические дефекты – зерна, отличающиеся по форме от гексаэдров (или их аналогов), а также промежуточные слои с зернами пирамидального типа. Однако подробный анализ таких моделей вряд ли целесообразен (прежде всего из-за своей сложности) и к тому же, в нашей постановке задачи, является необязательным, так как описание поведения двумерной модели ячеистой структуры с некоторыми непринципиальными изменениями (по форме, а не по сути) постулируется и на случай трехмерной модели зеренной структуры, поскольку обе модели выбраны нами с тем соображением, чтобы допускалось их взаимное адекватное отображение.

Целесообразность тщательного анализа (в математическом плане) более простой двумерной модели и распространения (с определенной смысловой и числовой коррекцией) уравнений, описывающих ее поведение во времени, на объемный вариант структурной модели была впервые обсуждена в работах [4, 5, 6].

Так как любой общий сегмент фронта роста (реакции) является дважды и разнознаковым искривленным (из-за несоответствия линейных размеров большой и контактирующих с нею малых ячеек), необходимо проследить за изменением обоих радиусов кривизны медленно распространяющегося фронта роста и по возможности установить хотя бы приближенную взаимосвязь в поведении этих радиусов. В случае малых и равноосных топологических дефектов, т.е. ячеек с числом одинаковых сторон, равным, например, трем, граничный фронт реакции будет во времени быстро сокращаться, а сама ячейка-дефект – уменьшать линейный размер (вплоть до полного своего исчезновения). При этом, как и в более стандартном случае, между обоими радиусами кривизны граничного фронта также должна существовать определенная взаимозависимость (об этом будет сказано в следующей публикации).

Таким образом, задача сводится к нахождению подходящего аналитического выражения (математической связи), в котором оба упомянутых радиуса кривизны (r и R) граничного сегмента были бы как-то связаны с линейными параметрами a и b, пропорциональными размерам ячеек, имеющих общую границу по линии этого сегмента [7].

Специально сделанная выше оговорка о медленно распространяющемся фронте роста крупной ячейки имеет свой определенный и весьма важный смысл. Речь идет о выделении в процессе роста ячеек таких временных стадий, когда средние радиусы кривизны граничного фронта r и R еще могли бы как-то изменяться, а линейные (размерные) параметры a и b практически сохраняли свои прежние значения или же меняли их, но не настолько быстро, чтобы существенно нарушилось функционирование определенного вида уравнения – связки.

Априори выдвинем гипотезу, что искомое соотношение между обоими радиусами кривизны граничного сегмента и меняющимися во времени параметрами смежных зерен (большого растущего зерна и малого, им “уничтожаемого”) имеет вид

$$r = a - \frac{b^2}{R}, \qquad (1)$$

где r – собственный радиус сегмента граничного фронта; R – радиус кривизны базисной линии граничного фронта; a – высота (размер) ячейки в виде трапеции или сторона граничной нормальной ячейки (тетрагона) при $R = \infty$; b – половина меньшего размера растущей ячейки эллипсного типа (параметры a и b выбираются в условиях равновесия натяжений в стыках ячеек по линии граничного фронта).

Найдем соотношения между линейными параметрами a и b, удовлетворяющие условию (1), для различных видов топологических дефектов, выступающих в качестве активных центров роста.

В случае двумерной пластины (рис. 3) $R = \infty$ и $r = a$; параметр b при этом, естественно, может быть любым. Иначе говоря, пластина, поглощающая с обеих сторон квадратные ячейки, имеет произвольную исходную ширину. Таким образом, отношение $r/R = 0$ можно рассматривать и как одно из граничных условий уравнения (1).

Выберем теперь в качестве объекта рассмотрения ячейку эллипсного типа с относительно небольшим (но более шести) числом круговых сегментов граничного фронта. И пусть оба радиуса кривизны r и R являются по величине соизмеримыми переменными.

Примем для определенности, что r/R = 1/2. Поскольку сегменты эллипсной ячейки имеют повышенную кривизну (из-за конечной кривизны “дуги” граничного фронта) r будет меньше a, где уже a – начальный размер (высота) ячеек – трапеций (искаженных тетрагонов), окружающих центральную ячейку-дефект (см. рис. 1 и 4)

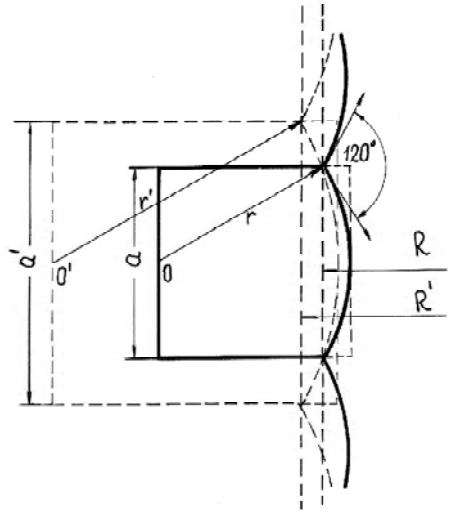
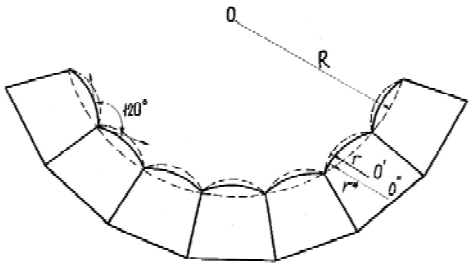
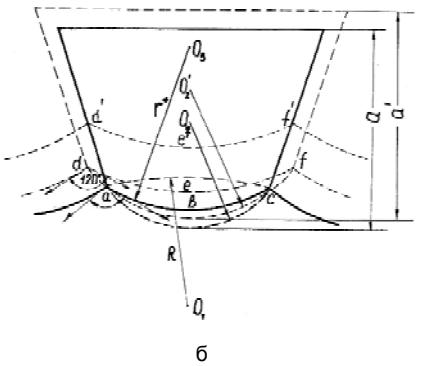


Рис. 3. Фрагмент теоретической модели двумерной зеренной структуры тетрагонального типа с топологическим дефектом в виде пластины (многосегментный граничный фронт имеет вдоль базовой линии нулевую кривизну и сбалансирован в стыках по натяжениям). Пунктирные линии характеризуют новую равновесную ситуацию с укрупнившимися в процессе роста ячейками



а



б

Рис. 4. Фрагмент теоретической модели двумерной зеренной структуры с топологическим дефектом в виде крупной многосегментной ячейки (эллипсного типа) и искривленным граничным фронтом (а); отдельная трапециидальная ячейка с размерными параметрами (пунктирные линии отвечают новой равновнесной ситуации после акта интегрального роста) (б)

Из чисто геометрических соображений (в условиях существования 120 ° стыков смежных круговых сегментов граничного фронта) следует, что $r \cong a/2$ (в случае ячеек гексагонов $r = a/2$). Тогда из уравнения (1) после подстановки r/R = 1/2 и замене r на $a/2$ можно получить приближенное соотношение $a \cong \sqrt{2}b$, которое служит важным признаком равномерности плоской зеренной структуры, т.к. в этом случае размер топологического дефекта мало отличается от размеров окружающих его зерен-трапеций. Если же принять, что r/R = 3/4, а r еще меньше отличается от $a/2$, то после реализации соответствующих подстановок уравнение (1) перейдет в соотношение $a \cong \sqrt{3}b$. Увеличение отношения a/b в этом случае по сравнению с предыдущим свидетельствует о еще большем “выравнивании” плоской зеренной (ячеистой) структуры.

И, наконец, возьмем предельное (для центров роста) значение отношения обоих радиусов кривизны, а именно r/R = 1. Для рассматриваемого случая r строго равняется $a/2$, так как топологический дефект вырождается в обычную равноосную ячейку-гексагон с прямолинейными граничными сегментами (поскольку $r = R = b$) и из уравнения (1) после замены r и R соответствующими значениями размерных параметров следует, что $a = 2b$ (предельная степень равномерности плоской структуры, ибо последняя представляет собой обычную гексагональную сетку, содержащую равные граничные отрезки). Следовательно, отношение r/R = 1 выступает в качестве второго краевого условия уравнения (1).

Попытаемся теперь обосновать (хотя бы с приближенных теоретических позиций) наше уравнение-связку. С этой целью приведем соотношение [1]:

$$\frac{1}{r^*} = \frac{1}{r} - \frac{1}{R}$$

к виду

$$r = \frac{Rr^*}{R + r^*} = \frac{r^*}{1 + \frac{r^*}{R}} \cong r^*\left(1 - \frac{r^*}{R}\right), \qquad (2)$$

т.к. для крупных топологических дефектов двумерной структуры всегда будет справедливым неравенство $r^*/R < 1$.

Прежде всего, отметим, что r^* мало меняется при миграции результирующей дуги (т.е. реального кругового сегмента искривленного граничного фронта), поскольку r и R по величине изменяются в одном направлении. Поэтому в уравнении (2) результирующий радиус выполняет функцию некоторого постоянного члена, который в зависимости от величины соотношения r^*/R, заданного в наиболее вероятном интервале допустимых значений (скажем, $0 \le r^*/R \le 1$), может

быть ассоциирован с тем или иным линейным параметром двух смежных ячеек, одна из которых в топологическом плане является структурным дефектом.

При больших значениях R $r^* \cong a$ (ячейка в этом случае близка по форме к тетрагону, а граничный фронт становится практически прямолинейным) и выражение (2) преобразуется в соотношение

$$r \cong a - \frac{a^2}{R}. \qquad (2, \text{а})$$

Однако в таком виде это соотношение не может выступать в качестве уравнения-связки, т.к. полностью не удовлетворяет граничным (краевым) условиям физической картины.

Действительно, при $r \cong a/2$, как известно (см. об этом выше), $\frac{r}{R} = \frac{1}{2}$ или $R = 2r \cong a$. Подстановка же $r \cong a/2$ в выражение (2, а) дает для R сильно завышенный результат ($R = 2a$), что в рассматриваемой ситуации нереально. С другой стороны, если опираться на условие $R = 2r$, то $r^* = Rr/(R-r) = R \cong b$ (топологический дефект по форме близок к правильному многоугольнику) и тогда из (2) следует

$$r \cong b - \frac{b^2}{R}. \qquad (2, \text{б})$$

И в этом случае при выполнении в принципе первого краевого условия (вспомним, что при $R = \infty$ параметр b может быть любым, в том числе и равным a) второе не выполняется (при $r/R = 1$ и $R = b$ r тоже должно равняться b, а не нулю). Поскольку в соотношениях (2, а) и (2, б) содержится весь набор варьируемых переменных (r и R) и практически постоянных для конкретного временного этапа роста параметров a и b), надо полагать, что в этих выражениях присутствуют как истинные, так и ложные члены, которые можно устранить путем перекрестного исключения.

Исключая в (2, а) второй член, а в (2, б) первый, получаем уравнение-связку в виде (1), которое, как уже было сказано выше, достаточно хорошо удовлетворяет граничным условиям рассматриваемой структурной картины.

Из последующего рассмотрения процессов роста зерен (ячеек) станет еще более очевидно, что функция "связки" выбрана достаточно удачно, т.к. с ее помощью можно получать самые общие решения, позволяющие легко переходить к известным частным.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Если допустить, что параметры a и b являются жестко фиксированными, то для сохранения 120 ° стыков вдоль всего граничного фронта (а именно эта особенность фронта косвенно заложена в структуру соотношения (1)) радиусы кривизны должны изменяться во времени совершенно произвольно, а топологические дефекты при этом обязательно эволюционировать по форме.

В том случае, когда a и b меняются плавно и крайне медленно, практически сохраняя свои значения при небольших и практически пропорциональных изменениях (в одном направлении) радиусов кривизны, топологический дефект проявляет в отношении своей конкретной формы определенный консерватизм для всего рассматриваемого временного интервала роста ячеистой (зеренной) структуры.

Рассмотрим более подробно ряд топологических структурных дефектов (речь, по-прежнему, идет о двумерной модельной или реальной (ячеистой) структуре), выступающих в качестве активных центров роста.

Мы уже выяснили, что в случае, когда $a \le b$, зоной роста служит двумерная пластина, поглощающая с одной (краевая ситуация) или с обеих своих сторон (граничных фронтов с прямолинейными базовыми линиями) слои параллельно ориентированных квадратных ячеек. Выясним теперь, какой же конкретной формой должна обладать ячейка роста, если в ее присутствии выполняется условие, характерное для практически равномерной структуры, а именно: $a \cong \sqrt{2}b$. Покажем, что сплюснутый восьмиугольник (неправильный дитетрагон) достаточно хорошо удовлетворяет этому условию.

На рис. 5 представлен двухсегментный фрагмент топологического дефекта эллипсного типа. Для его полного соответствия рассматриваемому случаю необходимо потребовать, чтобы $\gamma \cong 45^\circ$, а $\alpha = \beta$. Сразу же заметим, что при таком значении угла γ $\alpha = 15^\circ$ и $\angle eds = 60^\circ$. Тогда, по "теореме синусов", будем иметь

$$\frac{b}{\sin 60^\circ} = \frac{de}{\sin 45^\circ}$$

и далее $b\sqrt{2} \cong de\sqrt{3}$. Так как в нашем случае $\alpha = \beta$ и, следовательно, $r^* = R = 2r \cong a$ (ибо из (2) следует, что при $r^* = R$ $r/R = 1/2$), а $\frac{1}{2}de = r^* \sin\alpha$, то окончательно получаем

$$de = 2a\sin 15^\circ \cong 0{,}516a \quad \text{и} \quad b\sqrt{2} \cong 0{,}9a \cong a.$$

Таким образом, выполняемость соотношения $a \cong \sqrt{2}b$ для фигуры рассматриваемого вида практически очевидна. При этом, как и следовало ожидать, $\frac{r}{R} = \frac{1}{2}$ и функционирование уравнения-связки полностью обеспечено.

Найдем теперь конкретную форму для эллипсной ячейки роста, которая отвечала бы структуре, практически совпадающей с предельно равномерной ячеис-

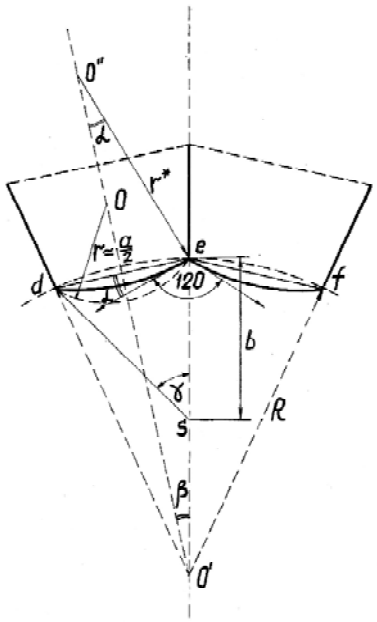


Рис. 5. Двухсегментный фрагмент искаженной тетрагональной структуры, включающий участок плоского топологического дефекта эллипсного типа (пояснение в тексте статьи)

той структурой, характеризуемой соотношениями $a \cong \sqrt{3}b$ и $\frac{r}{R} = \frac{3}{4}$. Если допустить, что искомая эллипсная ячейка должна иметь определенное сходство с искаженным (несколько сплюснутым) гексагоном, то надо проанализировать ситуацию, когда $\gamma \cong 60^\circ$. Для этого случая получаем $r^* = 3R$ и, $de = r^* \sin\alpha = R\sin(30^\circ - \alpha)$ (см. тот же рис. 5), приходим к уравнению $3\sin\alpha = \sin(30^\circ - \alpha)$, откуда $\alpha = 7{,}5^\circ$. Далее с помощью "теоремы синусов" получаем пропорцию

$$\frac{b}{\sin(60^\circ - \alpha)} = \frac{2R\sin(30^\circ - \alpha)}{\sin 60^\circ},$$

из которой окончательно имеем

$$\sqrt{3}b \cong \frac{8}{3}a\sin 22{,}5^\circ \cdot \sin 52{,}5^\circ \cong a$$

(здесь опять-таки $r \cong a/2$).

Следовательно, дефектная ячейка этого вида вполне приемлема для заданного уровня равномерности нашей плоской структуры и находится в достаточно хорошем согласии с уравнением-связкой.

И, наконец, оценим степень приемлемости топологического дефекта в виде ячейки-октагона (рис. 6). Для этой модели ячейки роста, в силу ее промежуточности, $\gamma = 45^\circ$, а $\alpha = 7{,}5^\circ$ (в соответствии с целевой установкой совершенно естественно снова ориентироваться на прежнюю величину отношения r/R).

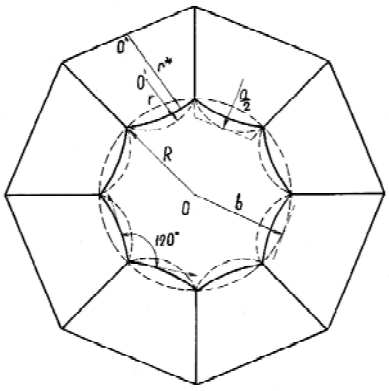


Рис. 6. Равноосный вариант топологического дефекта двумерной зеренной структуры, окруженного "ожерельем" трапецевидных ячеек

Поступая по аналогии с двумя предыдущими случаями, легко приходим к пропорции

$$\frac{b}{\sin(75^\circ - 7{,}5^\circ)} = \frac{2R\sin(30^\circ - 7{,}5^\circ)}{\sin 45^\circ},$$

которая в силу того, что $r = a/2$, приводит к промежуточному соотношению

$$a \cong 1{,}5b \quad \left(\sqrt{2} < 1{,}5 < \sqrt{3}\right).$$

Поэтому при необходимости использования рабочих соотношений для линейных параметров смежных ячеек типа $a = \sqrt{2}b$ или $a = \sqrt{3}b$ можно с некоторым приближением заменить ячейку роста эллипсного типа, для которой хорошо работает условие связки, ячейкой-октагоном, что делает иллюстративную сторону поведения двумерной структуры более наглядной (хотя такая равноугольная ячейка и плохо согласуется с уравнением-связкой).

Итак, попытаемся теперь получить аналитические выражения для скоростей ячеек (квадратных, топологически дефектных и промежуточных в виде трапеций) выбранной модели двумерной структуры. Основными рабочими формулами, служащими инструментом реализации поставленной цели, будут являться известные выражения для скорости миграции граничного сегмента [3], его движущей силы [1] и математическое условие-связка, устанавливающее взаимозависимость обоих радиусов кривизны этого сегмента, т.е.

$$\left.\begin{aligned} v &= mP; \\ P &= \varepsilon\left(1/r - 1/R\right); \\ r &\cong a - b^2/R, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где m – средняя микроскопическая подвижность сегмента; ε – удельная граничная энергия; a и b – имеют смысл текущих размерных параметров смежных яче-

ек, одна из которых является топологическим дефектом (ее размерным параметром служит *b*). В дальнейшем везде принимается, что параметры *a* и *b,* удовлетворяющие уравнению-связке, медленно и плавно возрастают во времени (оставаясь практически неизменными в рассматриваемых временных интервалах), а также монотонно слабо изменяют характер своего отношения (*a/b*).

Рассмотрим вначале простейший случай, когда $R = \infty$ и топологический дефект (центр роста) представляет собой двумерную пластину. На рис. 3 изображена одна из ячеек в форме тетрагона, круговой граничный сегмент которой входит в качестве одной из многих составляющих в общий (с дефектной ячейкой) граничный фронт с прямолинейной базовой (хордовой) линией.

Объединяя две первые формулы группы (3), получаем простое дифференциальное уравнение вида

$$v = \frac{dr}{d\tau} = m\varepsilon\frac{1}{r}, \qquad (4)$$

решение которого приводит к параболическому закону изменения радиуса кривизны любого сегмента граничного фронта во времени.

Действительно, из (4) следует

$$\int_{r_0}^{r} r dr = m\varepsilon\int_{0}^{\tau} d\tau,$$

где r_0 – начальное значение радиуса сегмента, при котором межсегментный угол составляет 120 °. Далее, после интегрирования имеем

$$r^2 = a^2 + 2m\varepsilon\tau, \qquad (5)$$

т.к. $r_0 = a$ (см. рис. 3).

Нетрудно заметить, что процесс роста в этом случае вызывает только увеличение ширины пластины центра роста (за счет постепенного "уничтожения" контактирующих с ней ячеек-тетрагонов) и не приводит к тенденции укрупнения базовых ячеек двумерной структуры (т.е. в этом случае существует определенное стремление к образованию по завершении роста большой моноячейки, если топологический дефект (пластина) присутствовал в структуре в единственном числе).

Процесс параболического изменения сегментов граничного фронта (движущая сила процесса P постоянно только уменьшается) является затухающим, однако по мере увеличения каждого радиуса нарушается условие равновесия в граничных стыках фронта роста (реакции), что приводит к возрастанию движущей силы, действующей на эти стыки ($P_{ст}$). В момент установления равенства двух движущих сил ($P = P_{ст}$) затухающий (нестационарный) процесс роста сменяется стационарным, при котором весь граничный фронт перемещается как единое целое (т.е. вместе со стыками) с постоянной скоростью. При этом обязательно должна измениться и конфигурация самих стыков.

Если $1/a$ – число стыков на единицу длины базовой линии граничного фронта (пунктирная линия), проходящая через тройные граничные узлы на рис. 3), то

$$P_{ст} = \frac{1}{a}\left(1 - 2\cos\frac{\theta}{2}\right)\varepsilon = \frac{1}{a}\left(1 - \frac{a}{r}\right)\varepsilon, \qquad (6)$$

т.к. $\cos\frac{\theta}{2} = \frac{a}{2r}$ (см. рис.3) и, поскольку в рассатриваемом случае $P = \varepsilon / r$, синхронизация движения сегментов и стыков граничного фронта осуществится в тот момент времени, когда текущее r станет равным $2a$ (результат совместного решения обоих уравнений для движущих сил). Подставляя это пороговое значение радиуса кривизны $r_{пор}$ в (4), получим выражение для скорости перемещения граничного фронта в стационарном режиме

$$v_{стац} = \frac{1}{2}m\frac{\varepsilon}{a}. \qquad (7)$$

При этом пороговое значение меж сегментного угла $\theta_{пор}$ определится из условия $\cos\frac{\theta_{пор}}{2} = \frac{a}{2r_{пор}} = \frac{1}{4}$ и составит приблизительно 151°.

Пусть теперь радиус искривления базовой линии граничного фронта является конечным, а двумерный топологический дефект структуры (центр роста) представляет собой ячейку эллипсного типа. Тогда для описания процесса роста (как в плане рассмотрения сиюминутных ситуаций, так и при определении тенденции поведения двумерной структуры во времени), необходимо уже пользоваться всеми тремя уравнениями группы (3).

Сначала преобразуем, входящее в эту группу условие "связки" к виду $\frac{1}{R} \cong \frac{a-r}{b^2}$, что позволит превратить выражение для движущей силы в функцию одной переменной (r). Действительно, после подстановки в формулу для P значения R^{-1} из уравнения-связки получим

$$P(r) = \varepsilon\left(\frac{1}{r} - \frac{a-r}{b^2}\right) = \varepsilon\frac{r^2 - ar + b^2}{b^2 r} \qquad (8)$$

(в уравнении-связке знак приблизительного равенства просто заменяем на знак равенства, т.к. полезное функционирование этого соотношения возможно лишь

при малых изменениях R и r). И, наконец, для скорости изменения радиуса r, ассоциируемого в любой момент времени с размером квадратной ячейки при равновесных граничных стыках ($\theta = 120°$), имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dr}{d\tau} = m\varepsilon \frac{r^2 - ar + b^2}{b^2 r}. \qquad (9)$$

Отметим одну важную особенность уравнения (9). Оно устанавливает определенный вид функциональной зависимости между радиусом исходного сегмента граничной квадратной ячейки и временем искривления граничного фронта "нормальные ячейки – топологически дефектная ячейка". Пользоваться реальным радиусом r^* нельзя, т.к. тогда математическое рассмотрение процесса роста по существу сведется к классическому случаю [8], который никак не учитывает фактор искривления граничного фронта растущей ячейки (вернее, наличие ее искривления вуалируется тем, что движущую силу процесса в такой ситуации выбирают в виде ε/r^*) и, следовательно, не может внести уточняющих нюансов в аналитическое выражение, являющееся решением уравнения (9). Более того, данный радиус никак не связан с размерами ячейки-тетрагона и устанавливаемый этим условием закон роста по сути ничего собой не выражает. Все вышесказанное делает понятным, почему в качестве неизвестного переменного дифференциального уравнения роста должен быть выбран радиус граничного кругового сегмента неискаженной ячейки.

При искривлении граничного фронта, помимо действующей на этот сегмент движущей силы, равной ε/r, возникает противодвижущая сила ($-\varepsilon/R$ или $\varepsilon(r-a)/b^2$), действующая на стыки фронта и тем самым благоприятствующая "сглаживанию" кругового сегмента, при установлении для стыков нового равновесного состояния, нарушенного актом искривления. Это объясняет, почему реальный (результирующий) радиус кривизны r^* должен быть обязательно больше r (при сохранении размера хорды сегмента). (Примечание: тетрагональные плоские ячейки прямолинейного граничного фронта после его искривления превращаются в искаженные ячейки трапециевидной формы с большим значением параметра a. Разворот квадратных ячеек порождает "клинообразные" разрывы двумерного пространства, "заделывание" которых и приводит к частичной трансформации формы граничных ячеек. Требование равноосности таких ячеек вызывает их рост в высоту, пока последняя не сравняется с размером средней линии трапеции (новое значение параметра a). Если перейти к последующим слоям (второму, третьему и т.д.) ячеек, расположенных вокруг топологического дефекта (рис. 1), то для них параметр a не остается фиксированным на определенном уровне, а продолжает медленно нарастать). Надо полагать, что средний размер основных ячеек структуры хорошо коррелирует с размером граничной ячейки (на любом этапе укрупнения всех структурных элементов нашей двумерной модели), т.к. этот размер отвечает промежуточному значению между размером квадратной ячейки (до искривления граничного фронта) и размером ячейки последнего слоя (этот слой располагается на половине расстояния между двумя топологическими дефектами – соседями).

Приведем выражение (9) к интегральному виду, (с указанием необходимых пределов)

$$\int_{r_0}^{r} \frac{r dr}{r^2 - ar + b^2} = \frac{m\varepsilon}{b^2} \int_0^{\tau} d\tau, \qquad (10)$$

где r_0 – снова начальное значение радиуса кривизны дуги ячейки-тетрагона, a и b – некоторые средние во временном интервале роста размерные характеристики контактирующих по линии фронта реакции ячеек (трапециевидных и топологически дефектных). После неполного интегрирования (10) получим общее решение уравнения роста двумерных ячеек в неявной форме

$$\ln \frac{r^2 - ar + b^2}{r_0^2 - ar_0 + b^2} + \int_{r_0}^{r} \frac{a dr}{r^2 - ar + b^2} = \frac{2m\varepsilon}{b^2}\tau. \qquad (11)$$

Если граничный фронт не искривлен, то $R = R_0 = \infty$ и

$$r^2 - ar \cong r_0^2 - ar_0 \cong 0 \quad (r \cong a, \quad r_0 \cong a_0).$$

Тогда уравнение (11) переходит в более простое выражение вида

$$\int_{r_0}^{r} r dr = \int_{a_0}^{a} a da = 2m\varepsilon\tau, \qquad (12)$$

где a – уже текущий размер плоской тетрагональной ячейки. Это уравнение отвечает по форме уравнению, получаемому при стандартном феноменологическом описании процесса роста [8], когда полагают, что все зерна-ячейки имеют одинаковый размер и форму (иногда упрощают ситуацию до зерен-сфер (или ячеек-окружностей), допуская при этом, что радиус кривизны границы раздела определяет не только размер зерна (ячейки), но и величину движущей силы процесса роста структурных элементов). Решение уравнения (12) дает параболический закон роста ячеек

$$r^2 - r_0^2 = a^2 - a_0^2 = 4m\varepsilon\tau \qquad (13\ а)$$

или зерен (для объемного варианта структуры)

$$r^2 - r_0^2 = a^2 - a_0^2 = 8m\gamma\tau, \qquad (13\ б)$$

что полностью совпадает с результатом упрощенного анализа процесса роста зерен-ячеек, который обычно демонстрируют в научных монографиях (см., например, [8, 9]) и учебной литературе.

Отметим одно важное обстоятельство, касающееся некоторых особенностей принятого многими авторами подхода к описанию поведения зеренной структуры во времени. Во-первых, при теоретическом рассмотрении процесса укрупнения зерен (или ячеек) обычно специально не выделяются (в качестве активных центров роста) топологически дефектные зерна (ячейки). Считается, что укрупнение элементов структуры происходит как бы само по себе под действием потенциальных движущих сил (при полном сохранении начальной равновесной конфигурации общего граничного фронта). Так, например, параболический закон роста радиуса искривления границ (13 б) по сути описывает изменение размеров всех шаров-зерен одновременно (r – выступает здесь уже как размерный параметр), т.е. фактически является законом-тенденцией укрупнения любого зерна структуры во времени. Казалось бы такое рассмотрение весьма примитивно и не может представлять никакой, помимо узко теоретической, ценности. Однако, если перейти от конкретных значений переменных к их средним характеристикам, то тогда модельная система из одинаковых зерен или ячеек может рассматриваться как усредненный аналог какой-либо реальной (однотипной по характеру) структурной картины, и в этом случае анализ поведения такого рода модели во времени уже может представлять определенный и не только теоретический интерес. Поэтому, и в дальнейшем речь будет идти лишь об изменениях средних размеров (за исключением отдельных частностей) зерен (ячеек), хотя исходные модели двумерной (трехмерной) структуры являются достаточно сложными, поскольку включают в свой структурный арсенал такие элементы реальности, как различного вида топологические дефекты с реальными движущими силами для их граничных сегментов.

Итак, при последующем анализе общего уравнения (9), (решение в форме (11)), как и при классическом подходе, будем полагать, что изменение r (в плане тенденции) достаточно хорошо коррелирует с изменением средних размеров ячеек во времени. Для этого, естественно, необходимо потребовать, чтобы функционирование уравнения-связки, а следовательно, и всех конечных уравнений, происходило в условиях сохранения формы топологических дефектов. Кроме того, для обеспечения однотипности, а одновременно и заданного уровня равномерности структуры, наряду с ростом нормальных квадратных ячеек (увеличение r как раз и характеризует рост таких ячеек, но уже как усредненных элементов реальной структурной модели), необходимо предусмотреть и пропорциональное увеличение ячеек-трапеций, входящих в состав “ожерелья”, и самих топологически дефектных ячеек, инициирующих протекание процесса роста. Вполне очевидно, что однотипность структуры может быть сохранена лишь в определенных временных рамках, когда число топологических дефектов-центров роста поддерживается на некотором постоянном уровне. Пунктирные контуры увеличенной в размерах (по сравнению с исходной), усредненной по двумерному пространству квадратной ячейки (рис. 3), и конкретной ячейки “ожерелья” в виде трапеции (рис. 4 и 5) как раз и определяют новое большее значение радиуса кривизны r (r' на обоих рисунках) по истечении некоторого промежутка времени.

И, наконец, последнее, о чем следует также сказать. Наш подход к установлению в аналитической форме определенной тенденции в изменении во времени средних характеристик рассматриваемой структуры (в виде $\bar{r}$ или $\bar{a}$) совершенно не предполагает (за исключением одного уже проанализированного выше частного случая роста топологического дефекта в виде пластины) анализа каких-либо деталей механизма роста ячеек (механизм роста определяется миграцией граничных сегментов и стыков), так как в процессе роста обязательно меняется исходная (равновесная) конфигурация активного (реакционного) граничного фронта (в процессе миграции условие $\theta = 120^\circ$ не выполняется). Рассмотрение деталей механизма роста в рамках нашего подхода невозможно из-за того, что второе и третье уравнения группы (3) функционируют только при соблюдении упомянутого контактного условия. Так что какого-либо другого подхода к описанию процесса укрупнения структуры при выбранных моделях и их математическом обеспечении (уравнения группы (3)) просто не существует.

Посмотрим теперь, во что обращается общее решение (11), если структура является в достаточной степени равномерной. Пусть несоответствие в линейных размерах ячеек в форме искаженных тетрагонов (трапеций) и ячейки-дефекты эллипсного типа (центра роста) является полуторным. В этом случае выполняются соотношения:

$$r_0 \cong a/2;\ a = \sqrt{2}b \ \text{ и } \ b^2 - a^2/4 = a^2/4 > 0 .$$

Тогда интегральное выражение в левой части уравнения (11) может быть приведено к виду

$$\int_{r_0}^{r} \frac{adr}{r^2 - ar + b^2} = a\int_{r}^{r} \frac{d\left(r - \frac{a}{2}\right)}{\left(r - \frac{a}{2}\right)^2 + \frac{a^2}{4r}} = 2arctg\ \frac{r - \frac{a}{2}}{\frac{a}{2}}\Bigg|_{r_0}^{r} =$$

$$= 2arctg\ \frac{r - r_0}{2} \cong 2\left[\frac{r - r_0}{r_0} = \frac{r - r_0}{r_0} - \frac{1}{3}\left(\frac{r - r_0}{r_0}\right)^3 + \ldots\right] .$$

Ограничимся лишь линейным членом разложения этой функции, отбросив остальные как величины вы-

соких порядков малости. Это требует рассмотреть только узкие интервалы изменения r, причем такие, что, хотя $r > r_0$, но $\frac{r - r_0}{r_0} < 1$. После выполнения замены с использованием вышеприведенных соотношений общее решение уравнения (11) приобретает более компактную форму [7]

$$\ln\frac{r^2 - 2rr_0 + 2r_0^2}{r_0^2} + 2\left(\frac{r}{r_0} - 1\right) \cong \frac{m\varepsilon\tau}{r_0^2}. \qquad (14)$$

Для объемного варианта структуры по аналогии с предыдущими случаями (см. [1]), где как раз использовался прием отображения двумерного пространства и всех присущих ему соотношений на его трехмерный аналог, это решение несколько видоизменяет свою правую часть

$$\ln\frac{r^2 - 2rr_0 + 2r_0^2}{r_0^2} + 2\left(\frac{r}{r_0} - 1\right) \cong \frac{2m\gamma\tau}{r_0^2}, \qquad (15)$$

где r – уже радиус шарового сегмента, а γ – зернограничная энергия (поверхностное натяжение).

Покажем, что оба приведенных логарифмических уравнения, которые можно трактовать как сложные законы, описывающие поведение (рост) элементов структуры (ячеек, зерен) вполне адекватно отвечают изменению физической реальности во времени. Здесь мы остановимся лишь на удовлетворении уравнений (14) и (15) (из-за постоянного уменьшения движущей силы) затухающему характеру процесса роста ячеек и зерен (об удовлетворении этих уравнений экспериментальным результатам речь будет вестись ниже). Для этого необходимо, чтобы кривые вида $r = r(\tau)$ были обращены выпуклостью кверху, т.е. характеризовались отрицательной кривизной $(d^2r/d\tau^2 < 0)$. Покажем на примере уравнения (15), что это действительно имеет место. Требование отрицательной кривизны для какой-либо "затухающей" функции в нашем случае обращается в свою противоположность при инверсии этой функции.

Нетрудно видеть, что уравнение (15), решенное относительно τ, как раз и представляет собой искомую обратную функцию. Действительно,

$$\frac{d\tau}{dr} = \frac{r_0^2}{m\gamma}\left\{\frac{\frac{1}{r_0}\left(\frac{r}{r_0} - 1\right)}{\left[\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 + 2\left(1 - \frac{r}{r_0}\right)\right]} + \frac{1}{r_0}\right\}$$

и

$$\frac{d^2\tau}{dr^2} = \frac{1}{m\gamma}\frac{1 - \left(\frac{r}{r_0} - 1\right)^2}{\left[\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 + 2\left(1 - \frac{r}{r_0}\right)\right]^2} > 0, \qquad (16)$$

т. к. ранее мы приняли для изменения r следующее ограничительное условие: $\frac{r - r_0}{r_0} < 1$. (Тем самым мы показали, что уравнение роста зерен (15) (как и уравнение роста ячеек (14)) описывает затухающий процесс в заданном интервале изменения радиуса кривизны r граничных сегментов зерен (или ячеек)).

Если взять другой тип топологического дефекта – сплюснутый гексагон, служащий признаком особо высокой степени равномерности структуры, то задающие конечный вид решения (11) размерные соотношения уже будут несколько иными: $r_0 \cong a/2$; $a \cong \sqrt{3}b$ и $b^2 - a^2/4 \cong \frac{1}{12}a^2 > 0$.

Тогда, например, для объемной адекватной структурной модели, отличающейся таким же высоким уровнем структурной равномерности (т.е. по существу являющейся изомерной), общее решение (11) переходит в логарифмическое уравнение

$$\ln\frac{3r^2 - 6rr_0 + 4r_0^2}{r_0^2} + \sqrt{12}\left(\frac{r}{r_0} - 1\right) \cong \frac{3m\gamma\tau}{r_0^2}. \qquad (17)$$

Однако это уравнение менее удобно для практического использования, чем уравнение (15).

И, наконец, полезно в рамках рассматриваемого круга вопросов обсудить возможность пропорционального изменения размеров топологически дефектной ячейки и окружающих ее нормальных ячеек в заданном интервале времени, без чего невозможно поддерживать одинаковый уровень равномерности структуры в процессе ее укрупнения. Для этого необходимо показать, что соответствующее изменение двух радиусов кривизны (R и r) не только не нарушает, но даже следует из уравнения-связки (11). Представим это уравнение в виде $R = \frac{b^2}{a - r}$. Кривая $R(r)$ может быть линеазирована в окрестности интересующей нас точки $r \cong \frac{a}{2}$ (топологические дефекты эллипсного типа, инициирующие укрупнение относительно равномерной структуры дают $r \cong \frac{a}{2}$). Угловой коэффициент этого

линеазированного участка кривой находится из равенства

$$R'_r = \left.\frac{b^2}{(a-r)^2}\right|_{r=a/2} = 4\left(\frac{b}{a}\right)^2. \qquad (18)$$

Для практически равномерной структуры $a = \sqrt{2}b$ и, следовательно, $R'_r = 2$. Тогда получаем $R(\tau) \cong 2r(\tau) + C$. Так как при $r_0 \cong a/2$ и $a = \sqrt{2}b$ справедливо соотношение $r_0 / R_0 = 1/2$ $\left(R_0 = R(\tau_0)\right)$, можно написать $R(\tau_0) \cong R(\tau_0) + C$, откуда $C \cong 0$ и окончательно

$$R(\tau) \cong 2r(\tau). \qquad (19)$$

Таким образом, пропорциональность изменения обоих радиусов кривизны в некотором достаточно узком интервале по существу доказана. Подытоживая все изложенное выше, легко прийти к выводу о необходимости обсуждения структурных изменений, обусловленных микроскопическим ростом зерен в однофазной среде (металлах и гомогенных сплавах), с позиции эволюционного перерождения моделей зеренной структуры (в направлении ее "выравнивания") и эволюции самих законов роста. Обсуждая макроскопический рост зерен, были сознательно опущены такие детали роста, как "поедание" зерна зерном, переключение (линейных отрезков или площадок) с одних точек (ребер) закрепления на другие, а также "тонкости" самого механизма миграции. Проводимое нами усреднение характеристик касалось как угловой разориентации границ и их энергетических параметров, так и поведения всей группы структурных элементов, составляющих основу выбранной модели зеренной или ячеистой структуры (чисто термодинамический подход). Поэтому, ведя разговор об эволюции структуры в процессе роста (на примере иллюстрационных моделей, имитирующих поведение того или иного вида структурной реальности), мы должны говорить о поэтапной смене практически конечных структурных состояний, без принятия во внимание различных промежуточных вариантов, которые не учитываются выбраными моделями структур, а следовательно, и уравнениями (законами) их размерных видоизменений.

С позиции такого подхода эволюция моделей (и законов роста) во времени укладывается в определенную последовательность структурных состояний (и описывающих их поведение уравнений), плавно переходящих одно в другое по завершении очередного этапа роста элементов структурной модели.

Рассмотрим такой перманентный переход (перерождение) на примере рассмотренной выше двумерной модели. Если в структуре присутствует достаточно большое количество статистически равномерно распределенных многосегментных (т.е. весьма крупных) ячеек эллипсного типа, то такую структуру следует отнести к категории "пестрых" структур, для которых хорошо выполняется (доминирует) параболический закон укрупнения ячеек (радиус R является по сравнению с радиусом r очень большим). На следующем этапе роста среднее удельное количество топологических дефектов сохраняется, однако число их активных сегментов снижается (при этом отношение R/r также уменьшается, хотя непосредственная величина R может оказаться более значительной, чем на предыдущем этапе роста). Постепенно структура делается практически равномерной, а число активных сторон (сегментов) у дефектных ячеек эллипсного типа уменьшается до восьми (при этом, $R/r = 2$). Закон роста ячеек становится чисто логарифмическим и описывается уравнением (14).

При переходе к структуре, близкой к предельно равномерной $\left(R/r = 4/3\right)$, топологически дефектная ячейка преобразуется в эллипсный гексагон, а закон роста нормальных ячеек продолжает оставаться по существу логарифмическим, хотя и изменяет несколько свой аналитический вид (уравнение (17)). Теоретически процесс роста ячеек завершается установлением двумерной гексагональной структуры (за счет предварительного устранения эллипсности у дефектных гексагонов в результате их перерождения в равноосные ячейки-гексагоны с искривленными сторонами (сегментами). Такие активные ячейки способны довести процесс роста до той стадии, когда ячейки-тетрагоны полностью исчезают, а сегменты гексагонов приобретают нулевую кривизну (реальный аналог – гексагональная дислокационная сетнка). Для такой структуры $R/r = 1$, а сама она отвечает промежуточному метастабильному состоянию, которое нетрудно устранить путем различных возмущений (флуктационной природы для реальных систем), приводящих к формированию в различных микрообластях двумерного пространства новых топологически дефектных ячеек (центров роста). Все эти этапы могут быть четко прослежены математически с установлением для очередного временного интервала конкретного закона роста, если варьировать отношение r/R (от 0 до 1) и в каждом таком интервале выбирать определенное отношение a/b (постоянное для этого временного интервала).

Теперь покажем, что полученные теоретические оценки хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Для этого преобразуем выражение (15) к виду

$$\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 2\left(\frac{r}{r_0} - 1\right) = \exp\left[\frac{2m\gamma\tau}{r_0^2} - 2\left(\frac{r}{r_0} - 1\right)\right] \qquad (20)$$

и рассмотрим настолько узкий интервал изменения r (в случае очень крупного начального зерна время прохождения этого интервала радиусом r будет весьма заметным), что r/r_0 будет только несколько больше единицы (т.е. r настолько несущественно превосходит r_0, что разница $r/r_0 - 1$ всего лишь несколько превышает нулевое значение). Отбрасывая слагаемые вида $2\left(\frac{r}{r_0}-1\right)$ в обеих частях полученного выражения (это, естественно, приводит к некоторому "ухудшению" формы кривой роста), сразу получаем

$$r^2 \cong r_0^2 \exp\left(\frac{2m\gamma\tau}{r_0^2}\right), \qquad (21)$$

откуда следует экспоненциальный закон роста зерен во времени [6, 10]

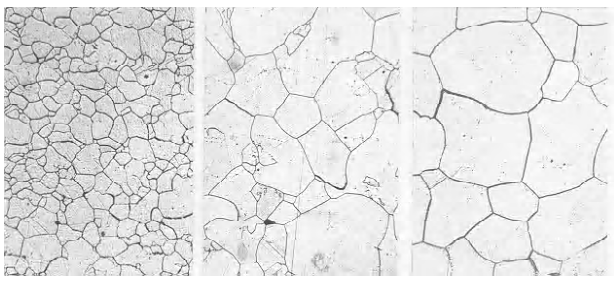
$$r \cong r_0 \exp\left(\frac{m\gamma\tau}{r_0^2}\right). \qquad (22\ а)$$

Заменяя $r = a^*$ и $r_0 = a_0^*$, получаем уравнение роста кубических зерен

$$a^* \cong a_0^* \exp\left[\frac{m\gamma\tau}{(a_0^*)^2}\right]. \qquad (22\ б)$$

Здесь a^* – приведенный текущий размер кубического зерна, равный половине его ребра; a_0^* – соответственно начальный размер такого зерна.

Некоторая приблизительность экспоненциального закона роста зерен в форме (22) с практической точки зрения является его полезной особенностью, т.к. позволяет оперативно устанавливать момент времени, когда закон начинает действовать (экспериментальные графические зависимости $\ln a^* - \tau$ (или $\lg V/S - \tau$), начиная именно с этого момента легко линеаризуются), и тем самым выделять при различных температурах стадии роста, практически подчиняющиеся экспоненциальному закону этого вида (рис. 7, 8 и 9) [3].



а б в

Рис. 7. Микроструктура высокочистого никеля (99,9999%) после отжига при 600 °С (а – 4 мин, б – 10 мин, в (практически равноосный вариант с топологически дефектными зернами) – 180мин); × 115

Рис. 8 и 9 отражают рост зерен в бинарных системах на основе высокочистых никеле и железе по закону $a^* \cong a_0^* \exp(k\tau)$, где k – "крутизна" экспоненты.

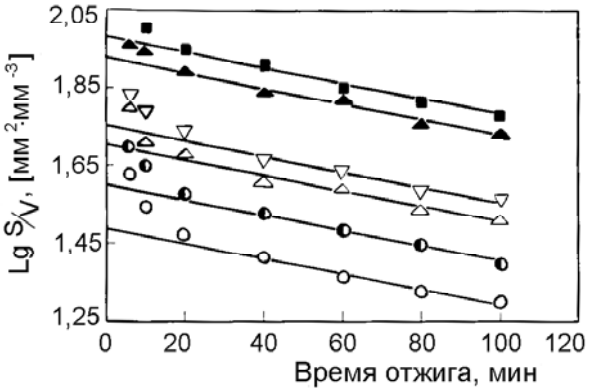


Рис. 8. Временные зависимости логарифма удельной поверхности границ зерен (отжиг 580°С):
○ – чистый Ni (99,9999 %); ◐ – Ni +0,4·10^{-4} ат. доли Zr;
△ – Ni+0,8·10^{-4} ат. доли Zr; ▽ – Ni+2,0·10^{-4} ат. доли Zr;
▲ – Ni+0,4·10^{-4} ат. доли Re; ■ – Ni+2,0·10^{-4} ат. доли Re

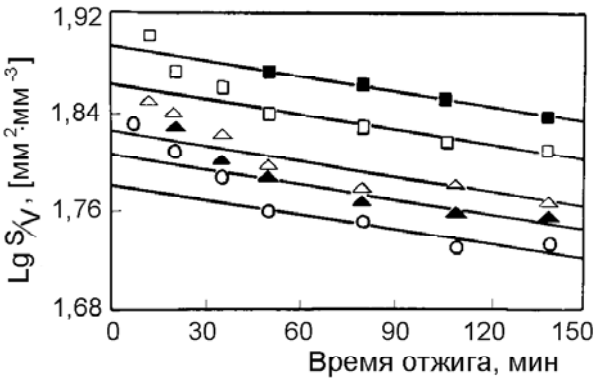


Рис. 9. Временные зависимости логарифма удельной поверхности границ зерен (отжиг 580°С):
○ – чистое железо (99,9980 %); ▲ – Fe +0,8·10^{-4} ат. доли Re;
■ – Fe+60,0·10^{-4} ат. доли Re; △ – Fe +0,8·10^{-4} ат. доли Zr;
□ – Ni+30,0·10^{-4} ат. доли Zr

В заключении стоит обратить внимание еще на такой интересный момент. В литературе отмечается (см., например, [10]), что, несмотря на существующий примитивизм феноменологического подхода к рассмотрению процесса укрупнения зерен (ячеек) во времени, получаемый в результате решения простейшего дифференциального уравнения (4) параболический закон роста (5) иногда выполняется (чаще всего в высокочистых системах [10]). Одной из причин этого может служить просто хорошая выполняемость обсуждаемого здесь экспоненциального закона; особенно, если изомерные зерна структуры являются достаточно крупными (рис. 7, в). Параболический закон в такой ситуации просто выступает в качестве производной формы более точного экспоненциального или логарифмического закона (первоосновы приближенного экспоненциального закона).

Список литературы

1. Ольшанецкий В.Е. О миграции межзеренных границ общего типа. 1. Потенциальные и реальные движущие силы миграции для различных двумерных и трехмерных моделей зеренной структуры // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2006. – №1. – С. 9-15.
2. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч.1. Дефекты решетки. – М.: Металлургия, 1982. – 278 с.
3. Ольшанецкий В.Е. Разработка научных принципов управления структурно-энергетическим состоянием внутренних граничных зон с целью улучшения свойств и служебных характеристик металлических материалов //Докт. дисс. (д.т.н.), Нац. металлург. академия Украини – Днепропетровск, 1993. – 397с.
4. Ольшанецкий В.Е. Об особенностях миграции границ в металлических системах с равномерной зеренной структурой // Физика процессов залечивания макро- и микродефектов в кристаллах / Препринт ИФМ 78. 9/ – К.: Институт металлофизики АН УССР, 1978. – С. 14-15.
5. Ольшанецкий В.Е., Степанова Л.П. О миграции границ в металлических системах // Новое в металловедении и обеспечение надежности и долговечности деталей машин методами термической обработки. Материалы международного научно-технического симпозиума, Запорожье-Москва, 1977. – С. 42-45.
6. Ольшанецкий В.Е. Общие закономерности структурных изменений при термической обработке /глава 1/ // Термическая обработка металлов. – К.: Вища школа, 1980. – С. 7-38.
7. Ольшанецкий В.Е. Топологические дефекты двумерной зеренной структуры как центры интегрального роста зерен – ячеек. Эволюция дефектов и законов роста во времени // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез. докл. IV Всесоюзн. научн.-техн. конф. 10-14 октября 1989 г. – Запорожье, 1989. – С. 28-29.
8. Бурке Дж., Тарнбалл Д. Рекристаллизация и рост зерен // Успехи физики металлов. – М.: Металлургиздат, 1956. – Вып.1. – С. 368-456.
9. Мак Лин Д. Границы зерен в металлах. – М.: Металлургиздат, 1960. – 322 с.
10. Ольшанецкий В.Е., Степанова Л.П. Об оценке энергии активации роста зерен в металлургических системах на основе никеля и железа // Металлофизика. – 1982. – Т.4. – № 2. – С. 101-107.

Одержано 7.11.2006

Теоретично обґрунтовується і підтверджується поведінкою високочистих однокомпонентних і бінарних металевих систем існування універсальних законів росту логаріфмічного (експоненціального) типу, котрі при реалізації процесу міграції меж зерен (комірок) трансформуються у закони росту степеневого типу.

The existing of universal logarythm type growth laws is theoretically based and proved by an example of highly pure single component and binary metal systems. These laws, under certain conditions of grain boundary migration process, are transforming to known degree laws.

УДК 541.135.6

Канд. техн. наук С. А. Воденников

Государственная инженерная академия, г. Запорожье

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ И МЕХАНИЗМА СПЛАВООБРАЗОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ПРЕССОВОК С АЛЮМИНИЕМ

Проведен комплексный анализ влияния параметров электролиза на механизм и структуру сплавообразования алюминия с титановыми прессовками. Установлено, что диффузионные процессы для неспеченных образцов более развиты, образование интерметаллида $TiAl_3$ протекает при плотности тока 0,5-0,65 А/см^2, а для спеченных 0,6-0,75 А/см^2.

Введение

Современный уровень развития технического прогресса во многом зависит от совершенствования технологии получения порошковых изделий. Особенно это стало актуальным в связи с ограничением доступа к высококачественным исходным материалам, многократным повышением их стоимости, а также дефицита. Наибольший процент брака приходится именно на его долю. Вследствие его окисления или насыщаемости азотом, появилась необходимость поиска новых

© С. А. Воденников, 2006

нетрадиционных способов уплотнения прессовки. Известно, что полезные свойства прессовки получают при значительном уплотнении, однако механические свойства определяются не только пористостью, но и другими факторами, влияние пористости на их свойства вполне закономерны и очевидны. С дугой стороны, порошковая металлургия является одной из перспективных технологий металлургического и машиностроительного производства. Острая необходимость в металлических порошках, порошковых материалах и изделиях объясняется широкими возможностями использования их при решении многих научно-технических задач. Основные преимущества порошковой металлургии перед другими технологическими процессами состоят в резком сокращении расхода материалов и электроэнергии при производстве изделий. Характерной тенденцией в развитии проблемы создания надежных конструкционных материалов в настоящее время является не только стремление сохранить износостойкость и коррозионную стойкость традиционных материалов, но и создание принципиально новых материалов с уникальными свойствами.

Если последнее десятилетие основным фактором в области создания новых материалов стало применение методов порошковой металлургии, то сейчас аналогичное явление начинает оказывать техника нанесения поверхностных покрытий и обработка поверхности. Рациональное использование защитных покрытий может при современном уровне развития технологии их нанесения дать экономию десятков миллионов тонн черных и цветных металлов в год [1]. Для повышения прочностных характеристик порошковых изделий и расширения диапазона рабочих температур можно использовать электролитический алюминий. В процессе электролиза происходит диффузия алюминия вглубь прессованного изделия и сплавообразования двух металлов, а также уплотнение и частичное спекание изделия за счет высокой температуры процесса. Этот способ позволяет получить равномерное покрытие достаточной толщины сложных по форме изделий при сравнительно низких температурах (873-903K). Рассмотрение вопросов исследования механизма и кинетики электроосаждения алюминия на различные структуры подложек из титана актуальны и своевременны, так как это позволяет более глубоко понять природу сплавообразования, выбрать оптимальные параметры электролиза и прогнозировано синтезировать интерметаллические соединения (ИМС) с заданными свойствами.

Материалы и методика эксперимента

В настоящей работе исследовали электрохимическую кинетику процесса осаждения алюминия из расплава солей $A1F_3$-NaF-NaCl [2] на образцы прессованного титана, подвергнутые: а) одному холодному прессованию (сырые образцы); б) холодному прессованию и спеканию (спеченные). Для снятия поляризационных кривых применялась установка, схема которой представлена на рис. 1. Поляризация катода велась от потенциостата ПИ-50-1, работающего в гальваностатическом режиме. В качестве электрохимической ячейки (5) использовали синтеркорундовый тигель со специальными электродами (рис. 2). С помощью кривых выключения (рис. 3) определяли потенциал катода при предельной плотности поляризационного тока. Дальнейшие исследования были направлены на проверку характерных закономерностей электрохимических параметров в процессе осаждения алюминия на образцы титановых колец на специально разработанной промышленной установке [3]. Подвергнутые электролитическому алюминированию образцы исследовали металлографическим и рентгеноструктурным анализами. Рентгеноструктурный анализ выполнен на установке ДРОН-3М при излучении медного анода. Работали с K_α- излучением, средняя длина волны $d_{ср} = 1{,}54138\,\mathring{A}$. Применяли фильтр из никелевой фольги для получения монохроматического излучения. Для рентгеноструктурирования был выбран режим съемки: напряжение на рентгеновской трубке 28 кВ и ток 10 тА, скорость передвижения счетчика 1 град/мин. Металлографические исследования микроструктуры покрытий проводили с помощью оптического микроскопа МИМ-8М.

Результаты исследования

Сравнительный анализ поляризационных кривых (рис. 4) показывает, что в начальный момент электролиза электродный потенциал катода из титана после спекания выше, чем сырого, в 1,3 раза (соответственно 4 и 3 В). При росте плотности тока до 0,13 А/см^2 (кривая "δ") происходит резкое снижение потенциала, что свидетельствует о преимущественном выделении и кристаллизации чистого алюминия.

Особый интерес представляет интервал плотностей тока 0,5-0,65 А/см^2, в котором образуется интерметаллическая фаза при практически постоянном потенциале на катоде. Образование интерметаллической фазы для титана после спекания (кривая "α") происходит при более высоких плотностях тока 0,6-0,75 А/см^2. Это свидетельствует о затруднении диффузии Al в более плотной структуре подложки. При плотности тока более 1,1 А/см^2 (кривая "α") наступает равновесное состояние, характерное для выделения чистого алюминия. Рентгеноструктурный анализ показал, что исходные спеченные образцы состоят из α-Ti (рис. 5, кривая 1). В готовом изделии (рис. 5, кривая 2) сохранялась структура α-Ti и образовались новые фазы – интерметаллид $TiAl_3$ (новые пики на кривой 2). Так как электролиз алюминия не оказал существенного влияния на структуру основы титановых образцов, то рентгенограммы образцов, исходного и после электролиза, имеют одинаковый характер, за исключением новых пиков образования алюминидов.

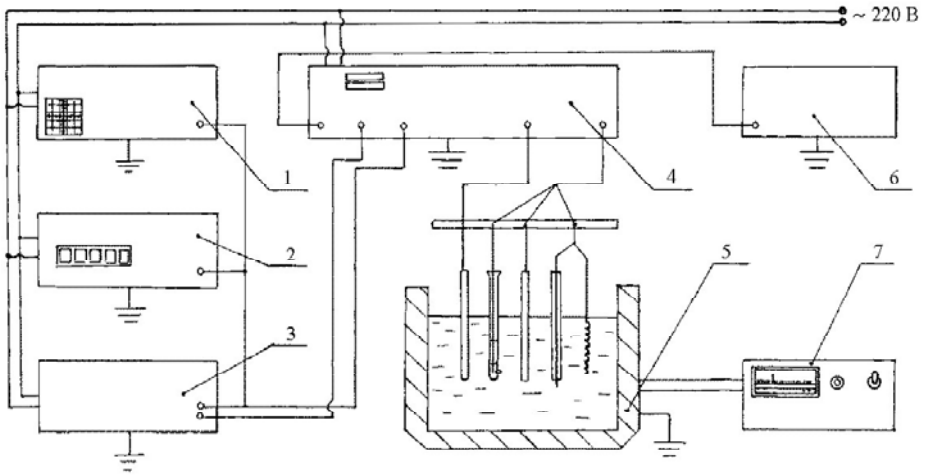


Рис.1. Принципиальная схема установки для снятия гальваностатических поляризационных кривых:

1 – осциллограф С8-13; 2 – вольтметр В7-21А; 3 – регистрирующий прибор ПДА1; 4 – потенциостат ПИ-50-1.1; 5 – электролитическая ячейка; 6- программатор ПР-8; 7 – милливольтметр

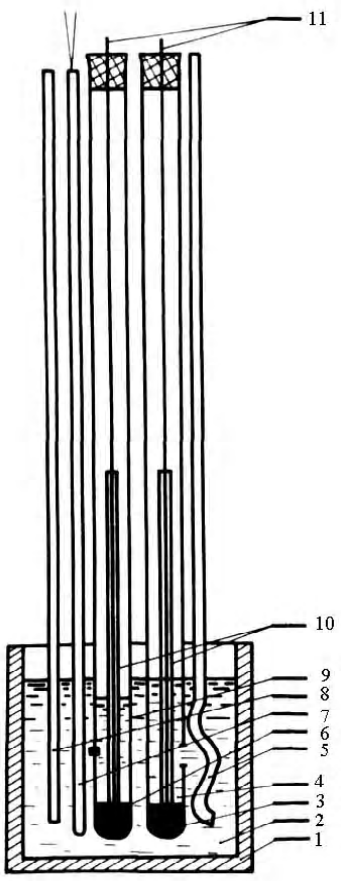


Рис. 2. Схема электрохимической ячейки:

1 – синтеркорундовый тигель; 2 – электролит; 3 – катод; 4 – пробирка из молибденового стекла; 5 – вспомагательный молибденовый электрод; 6 – свинцовый электрод сравнения; 7 – термопара; 8 – графитовый анод; 9 – стеклянная пробирка; 10 – синтеркорундовые трубочки; 11 – молибденовые токоподводы

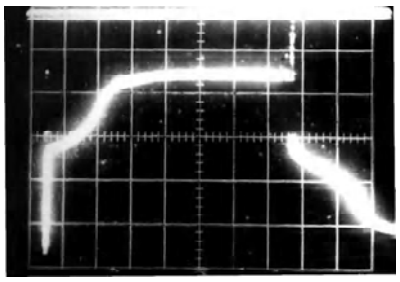


Рис. 3. Кривая выключения (общий вид):
по горизонтали: 1 деление – 1 сек;
по вертикали: 1 деление – 0,5 В

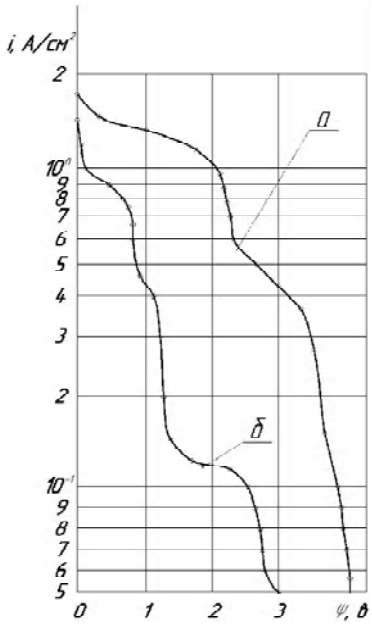


Рис. 4. Катодная поляризация титана в расплаве AlF_3-NaF-NaCl:
а – титан после спекания; б – титан после холодного прессования

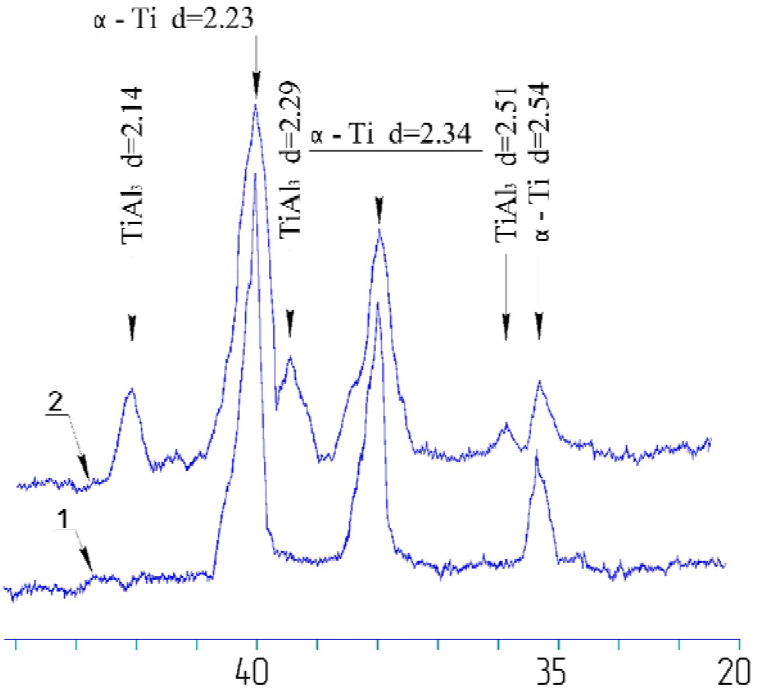


Рис. 5. Дифрактограммы титана: исходные 1 и с алюминидным покрытием 2

Микроструктурный анализ “сырого” и спеченного алюминированных образцов подтверждает, что диффузионное проникновение Al вглубь образца, его сплавообразования с титаном имеет ряд отличительных черт (рис. 6, 7). Во- первых, алюминий легче и глубже диффундирует в “сыром” образце, во- вторых, структура диффузионного слоя более плотная. Наряду с α -титаном присутствует интерметаллическая фаза и твердый раствор алюминия в титане. Установлено, что для всех видов образцов характерно снижение размера зерен и повышение поверхностной плотности по сравнению с исходным образцом. Однако диффузионные процессы в “сыром” образце более развиты, поэтому глубина проникновения алюминия достигает 700 мкм, а вот диффузионный слой спеченного образца достигает лишь 300-500 мкм. По всей видимости, это связано с исходным состоянием структуры прессованного титана. В “сыром” образце процессы рекристаллизации протекают легче, что связано с лучшим плакированием титана алюминием, совместной диффузией и сплавообразования на основе интерметаллида $TiAl_3$. Поверхностная энергия жидкой фазы алюминия способствует дроблению зерен титана, их перегруппировке и уплотнению [4, 5].

Выводы

1. Определены интервалы плотностей тока электроосаждения ИМС системы алюминий- титан с помощью анализа и обобщения поляризационных кривых.

2. Установлено влияние структуры материала подложки и последствий термообработки на механизм формирования диффузионного интерметаллидного слоя.

3. Показано, что с помощью электролитического алюминирования возможно значительное уплотнение и упрочняющие сплавообразование титановых прессовок.

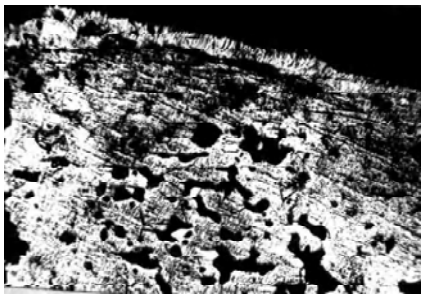


Рис. 6. Микроструктура алюминированного образца титана после спекания, × 300

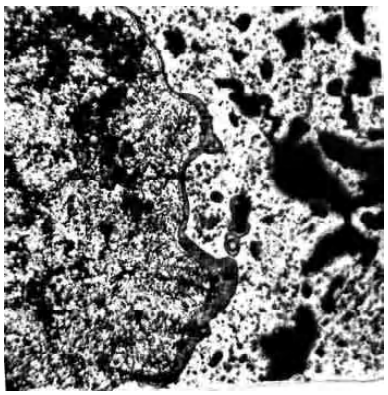


Рис. 7. Микроструктура “сырого” алюминированного образца титана, × 200

Список литературы

1. Воденников С.А., Богуславский Д.Ю., Темногорова Н.В. Получение электролитическим способом интерметаллов системы Al-Ti на поверхности изделий, спрессованных из титанового порошка // Технология и оборудования производства цветных и черных металлов и сплавов. – Киев, 1991. – С. 34-38.
2. А.С. 1708941 СССР, МКИ С25Д/ 366. Способ электрохимического алюминирования. / Н.В. Темногорова, И.П. Хараман, С.А. Воденников и др. (СССР). 1992 г., Бюл. №4.
3. Воденников С.А., Тарасов В.К., Воденникова О.С. Пристрій для нанесення покриттів / Деклараційний патент на винахід № 10686 (UA) С25D5/06 Бюл.№11, 2005р. от 15.11.2005 р.
4. Воденников С.А., Гусаров О.О., Катранова И.В. Повышение эксплуатационных характеристик порошковых изделий с помощью электролиза ионных расплавов. / Металлургия. Труды Запорожской государственной инженерной академии. Вып. 2., Запорожье, ЗГИА, 1999. – С. 89-91.
5. С.А. Воденников. Улучшение качества изделий из порошковых материалов /Металлургия. Труды Запорожской государственной инженерной академии. Вып.4., Запорожье, ЗГИА. – 2001. – С. 55-57.

Одержано 23.11.2006

Проведено комплексний аналіз впливу параметрів електролізу на механізм та структуру утворення сплаву алюмінію з титановими пресовками. Встановлено, що дифузійні процеси для неспечених зразків більш розвинені, утворення інтерметаліду $TiAl_3$ витікає при щільності струму 0,5-0,65 А/см^2, а для спечених 0,6-0,75 А/см^2.

The complex analysis of electrolyte parameters influence on mechanism and structure of alloy formation of Al with Ti pressing. It was established that diffusion processes for nonsintered samples are more developed, the formation of intermetallyde $TiAl_3$ process during 0,5-0,65 A/cm2 current density and for sintered samples 0,6-0,75 A/cm2.

УДК 669.548

Є. Л. Жавжаров, канд. техн. наук Г. А. Бялік, д-р фіз.-мат. наук В. М. Матюшин

Національний технічний університет, м Запоріжжя

МОДИФІКАЦІЯ ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК ПІД ДІЄЮ АТОМІВ ВОДНЮ

Досліджено вплив атомарного водню на електрофізичні і структурні властивості тонких плівок нікелю, отриманих термічним вакуумним випаровуванням на діелектричні підкладинки. Зразки піддавались обробці в атомарному водні з концентрацією $10^{18} \div 10^{19}$м$^{-3}$ при температурі 300÷310 К і тиску ~20 Па. Показано, що обробка плівок в середовищі атомарного водню призводить до зміни електрофізичних і структурних параметрів плівок. Встановлено механізм зміни параметрів плівок, який пояснює результати дослідження.

Вступ

На сьогоднішній день тонкі металеві плівки широко використовуються як захисні, функціональні (датчики), технічні (металізація ІС) й ін. покриття. Для забезпечення необхідних електрофізичних властивостей тонких плівок і межі розділу плівка – підкладинка у більшості випадків доводиться ускладнювати технологію отримання таких плівок. Одним із варіантів вирішення такої задачі є використання двошарових плівок: перший шар плівки забезпечує задані властивості гетеромежі металева плівка – підкладинка, а другий – необхідні властивості самої плівки [1]. Іншим варіантом отримання плівок є нанесення плівки з подальшою модифікацією її властивостей і межі розділу шляхом енергетичної дії на систему, наприклад термічним відпалом [2, 3] або дією високоенергетичних частинок [4]. Використання обох варіантів пов'язано з небажаною дією на параметри підкладинки і ускладненням технологічного процесу, а отже, і збільшенням вартості готового виробу.

Одним з альтернативних методів модифікації приповерхневих шарів твердого тіла і тонких плівок є використання енергії, що виділяється на поверхні твердих тіл при протіканні екзотермічних поверхневих процесів (адсорбція, рекомбінація, хімічні реакції і т.і.). Так, при рекомбінації атомарного водню на поверхні твердого тіла виділяється значна енергія (4,48 еВ на один акт рекомбінації) [5], яка може приводити до розпилення і дифузії атомів плівки у підкладинку [6].

© Є. Л. Жавжаров, Г. А. Бялік, В. М. Матюшин, 2006

У зв'язку з цим видається можливою модифікація параметрів тонких плівок під дією активних атомів водню. Ця робота присвячена вивченню процесів, що відбуваються при взаємодії атомарного водню з тонкими металевими плівками. Матеріалом для плівки було обрано нікель, оскільки він досить часто використовується для тонких плівок в мікроелектроніці [7, 8], а взаємодія водню з нікелем добре вивчена.

Методика проведення експерименту

Досліджували тонкі плівки Ni завтовшки 0,05 та 0,02 мкм, отримані термічним випаровуванням у вакуумі $_{5} \cdot 10^{-3}$ Па при температурі підкладинок 300÷330 К. Як підкладинки для плівок були використані ситал СТ-50-1 з шорсткістю поверхні Rz < 0,032 мкм і відколок монокристалу NaCl. Ефективну товщину плівок розраховували за зміною маси контрольної підкладинки.

Зміна роботи виходу електрона металевих плівок Ni під дією атомарного водню досліджували шляхом вимірювання контактної різниці потенціалів методом динамічного конденсатора [9]. Опір тонких плівок досліджували на спеціально створених зразках. Термічним випаровуванням у вакуумі через маску на діелектричну підкладинку наносився шар нікелю товщиною ~2×3 мкм, який надалі відігравав роль контактів. Далі проводилося напилювання тонкої плівки Ni і структура механічно розділялася на смуги (шириною 3×4 мм, завдовжки 60 мм), по краях яких розташовувалися контактні площадки. До контактних площадок припаювали виводи, які разом із площадками захищали від дії атомарного водню за допомогою компаунда. Тонкі плівки піддавались обробці атомарним воднем у вакуумній камері при кімнатній температурі.

Атомарний водень утворювався при дисоціації молекулярного водню в плазмі високочастотного розряду. Молекулярний водень одержували електролізом з розчину KOH в дистильованій воді. Далі водень проходив через форбалон для уловлювання крапель KOH, осушну колонку, заповнену силікагелем, і поступав у робочу камеру. Концентрацію атомарного водню вимірювали калориметричним методом [10].

Температура зразків у процесі обробки атомарним воднем контролювалася за допомогою хромель-копельової термопари, закріпленої зі зворотного боку підкладинки з плівкою. Під час обробки вимірювали і фіксували температуру та опір плівок.

Мікроструктуру плівок досліджували на електронному просвічувальному мікроскопі, для чого плівки нікелю наносили на свіжий відколок монокристалу NaCl. Термічне вакуумне напилення плівок Ni здійснювали в єдиному технологічному циклі на всі підкладинки (ситал, NaCl), що дозволило отримати близькі за властивостями плівки Ni. Після обробки зразків в атомарному водні необхідну для дослідження вільну плівку Ni одержували шляхом розчинення NaCl в дистильованій воді. Плівку виловлювали на спеціальну сіточку і поміщали в колону мікроскопа. Структуру плівок досліджували у двох режимах – режимі мікродифракції та дифракції на просвіт. Міжплощинні відстані (d) експериментальних зразків плівок розраховували на основі сталої мікроскопа і радіуса (R) спостережуваних кілець електронограм. Сталу мікроскопа визначали за електронограмами еталонної речовини – MgO.

Результати експерименту і їх обговорення

Дослідження потенціалу поверхні методом динамічного конденсатора показало, що при взаємодії атомарного водню із поверхнею тонких плівок Ni відбувається зміна потенціалу поверхні (рис. 1), у той час як взаємодія із молекулярним воднем не викликає таких змін. Зміна потенціалу при взаємодії на ~0,6 еВ (рис. 1) пов'язується з процесами адсорбції, а отже, і дифузії водню, що ефективно протікають на поверхні.

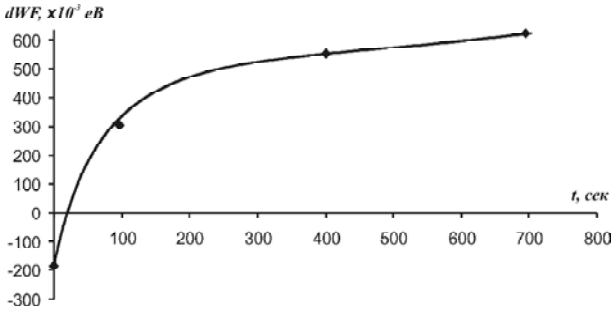


Рис. 1. Зміна потенціалу поверхні плівки Ni від часу обробки атомарним воднем

Взаємодія водню з металами, яка супроводжується дифузією і розчиненням водню в об'ємі, зазвичай приводить до збільшення електричного опору [11, 12]. Дослідження дії атомарного водню на опір тонких плівок Ni показало, що опір плівок може не тільки зростати, але й зменшуватися.

Із залежності опору плівки Ni від часу обробки атомарним воднем (рис. 2) видно, що на початковому етапі взаємодії опір плівки збільшувався на 1÷2 %. При цьому спостерігалося підвищення температури зразків на 10÷20 К. Розігрів зразків пов'язується із дисипацією енергії рекомбінації атомарного водню в молекулярний на поверхні плівки. Очевидно, що зростання опору плівки може бути пов'язано як із збільшенням температури зразків, так і з дифузією та розчиненням водню в об'ємі плівки. Порівнюючи кінетику процесу адсорбції і зміни опору та враховуючи великий коефіцієнт дифузії водню в Ni, найбільш імовірним слід вважати тепловий механізм підвищення опору.

На наступному етапі взаємодії атомарного водню з плівкою Ni (час обробки більше 15 хв.) опір зменшувався. Виявлено, що ефективність зміни опору плівок залежить від концентрації атомарного водню (рис. 2,а і 2,б): при зменшенні концентрації зміна опору плівки виявляється також меншою.

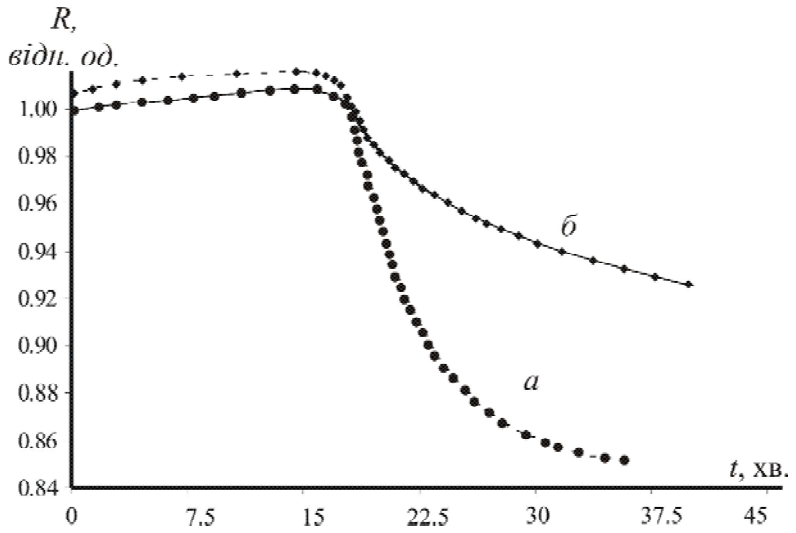


Рис. 2. Залежність опору плівки Ni (0,05 мкм) від часу обробки атомарним воднем при різних концентраціях H: а – $C_н \approx 10^{19}$ м$^{-3}$, б – $C_н \approx 10^{18}$ м$^{-3}$

Як відомо, опір тонких плівок залежить не тільки від товщини плівки, але й від структури плівки, а отже, й від технології отримання плівки. Так, опір дрібнокристалічної плівки буде вищим, ніж опір крупнокристалічної за рахунок процесів міжграничного розсіювання [13]. Оскільки металева плівка наносилася термічним випаровуванням у вакуумі на підкладинки, що знаходилися при кімнатних температурах, а в процесі взаємодії спостерігався розігрів зразків, то зменшення опору може бути пов'язано з процесами, які відбуваються при відпалі плівок – кристалізацією та поліпшенням структури. Для підтвердження запропонованого механізму були проведені додаткові експерименти з дослідження електрофізичних властивостей плівок.

Дослідження впливу відпалу при 373 К на опір плівок показали, що відпал також приводить до зменшення опору. Проте ефективність відпалу при 373 К (рис. 3, б) виявилася меншою, ніж обробка такої ж плівки в середовищі атомарного водню (рис. 3, а). Отже, зменшення опору пов'язується із поліпшенням структури тонких металевих плівок, нанесених на підкладинку термічним випаровуванням у вакуумі.

Для уточнення механізмів взаємодії атомарного водню з тонкими плівками Ni була досліджена мікроструктура тонких плівок Ni, нанесених в єдиному технологічному циклі з попередніми зразками, але на підкладинки з монокристалу NaCl. Дослідження контрольних зразків таких плівок і зразків, оброблених атомарним воднем протягом 30 хвилин за допомогою електронографічних досліджень, показали, що зразки мають різні рефлекси електронограм (рис. 4).

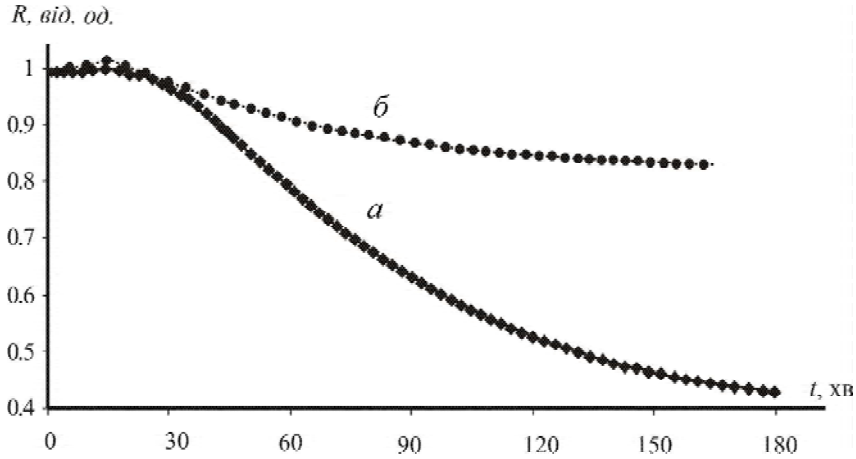


Рис. 3. Зміна опору плівки Ni (0.02 мкм) від часу обробки:
а – обробка атомарним воднем при $C_н \approx 10^{18}$ м$^{-3}$; б – відпал при $T \sim 370$ К

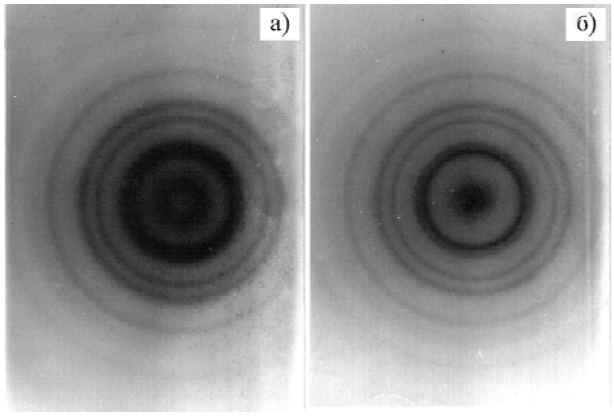


Рис. 4. Електронограми плівки Ni:
контрольна (а) і модифікована в Н (б)

З рисунка 4 видно, що після обробки плівок Ni атомарним воднем рефлекси електронограм (рис. 4, б) мають більш чіткі межі. Особливо це помітно для першого і другого рефлексів. Згідно з [14], розмитість рефлексів вказує на наявність значних внутрішніх напруг, а також на великокутові розорієнтування кристалографічних осей різних кристалітів один відносно іншого. Збільшення різкості рефлексів вказує на зміни в структурі плівки: зняття внутрішніх напруг і процеси кристалізації, що відбулися. Окрім візуальних відмінностей, підрахунок радіуса спостережуваних електронограм R показав, що змінились міжплощинні відстані *d*. Згідно з [15], Ni може знаходитися в двох фазах – α і β, які відповідають двом просторовим структурам – кубічній гранецентрованій і гексагональній. При порівнянні розрахункових міжплощинних відстаней із табличними виявилося, що після обробки атомарним воднем плівки Ni міжплощинні відстані співпадають з табличними для б-модифікації Ni з точністю 1 %. Міжплощинні відстані для контрольної плівки істотно відрізняються від табличних даних для обох модифікацій нікелю, що свідчить про відсутність строгої структури і близькість плівки за структурою до аморфної.

З фотографій поверхні плівки до та після обробки атомарним воднем, поданих на рис. 5, видно, що поверхня плівки після обробки більш шорстка. Отже, плівка Ni, отримана термічним вакуумним напиленням на діелектричні підкладинки (ситал, монокристал NaCl) при температурах, близьких до кімнатної, має дрібнокристалічну розупорядковану структуру, близьку за властивостями до аморфної. При цьому в плівці спостерігаються внутрішні напруги, викликані різницею періоду кристалічної ґратки напилюваного матеріалу і матеріалу підкладинки. Обробка плівок Ni атомарним воднем супроводжується складним комплексом процесів взаємодії атомарного водню з поверхнею плівки, які викликають зміну електрофізичних властивостей металів. Як відомо [16], розчинення атомів водню в кристалічній ґратці масивних зразків металів супроводжується збуренням фононного та електронного спектрів матриці, що призводить до локальних викривлень ґратки, збільшення сталої ґратки, появи крихкості матеріалу. При цьому у наводнених зразках спостерігається розмиття ліній рентгенограм [11]. У нашому ж випадку після обробки спостерігаються більш чіткі рефлекси. Отже, домінуючий механізм взаємодії атомарного водню з тонкими плівками Ni відрізняється від механізму взаємодії водню з масивними зразками металів. Домінуючим чинником модифікації властивостей плівок слід вважати дисипацію енергії рекомбінації атомарного водню, завдяки якій в приповерхневих шарах ініціюється процес кристалізації і відбувається збільшення електропровідності тонких металевих плівок.

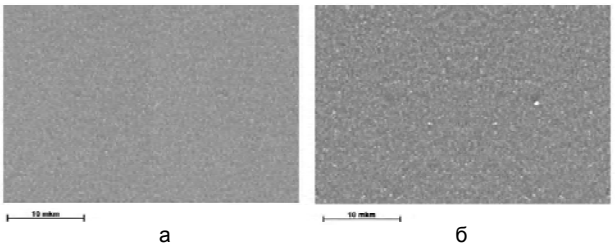


Рис. 5. Поверхня плівки Ni:
контрольна (а) і модифікована в Н (б)

Висновок

Отже, під дією атомарного водню на поверхні тонких плівок протікає такий комплекс процесів, який призводить до зміни їх електрофізичних і структурних властивостей.

На початкових етапах взаємодії активно відбуваються процеси адсорбції, а отже, і дифузії водню, що призводить до зміни поверхневого потенціалу плівок. При цьому швидкість протікання цих процесів досить велика, і вже через 300-350 секунд обробки на поверхні встановлюється стабільний для цих умов обробки потенціал.

Внаслідок рекомбінації атомарного водню на поверхні тонких плівок виділяється енергія. Дисипація цієї енергії приводить до виникнення процесу кристалізації і, отже, до поліпшення структури цих плівок. Після обробки в атомарному водні протягом 30 хвилин металеві плівки, які напилювалися у вакуумі на підкладинки при температурах, близьких до кімнатних, і мали невпорядковану структуру (міжплощинні відстані такої плівки істотно відрізнялись від табличних значень), зазнають структурних змін за рахунок енергії рекомбінації. Після обробки атомарним воднем, як показують електронографічні дослідження, параметри структури таких плівок наближаються до параметрів структури α-Ni, яка має кубічну гранецентровану ґратку.

Процеси кристалізації супроводжуються зростанням розміру кристалітів, а відповідно, і збільшенням шорсткості мікрорельєфу поверхні, що спостерігається експериментально при електронно-оптичних дослідженнях.

Процеси кристалізації і поліпшення структури плівок приводять до зміни електропровідності плівок. За рахунок зменшення центрів розсіювання електропровідність плівок зростає. Виявлено, що процеси модифікації залежать від параметрів процесу обробки – часу взаємодії і концентрації атомарного водню. Зі збільшенням концентрації атомарного водню збільшується ефективність зміни електропровідності плівок.

Отже, обробка плівок Ni атомарним воднем дозволяє поліпшити структуру тонких металевих плівок і змінити їх електрофізичні властивості при температурах, близьких до кімнатних. За результатами дослідження видається можливим створення технології низькотемпературного нанесення тонких металевих плівок з поліпшеними параметрами на різні діелектричні покриття.

Список літератури

1. Пат. 6423201 США, МПК{7} C 23 C 28/02; Applied Materials, Inc., Mandrekar Tushar. – N 09/644968; Заявл. 23.08.2000; Опубл. 23.07.2002; НПК 205/186.
2. Чапланов А. М., Маркевич М.И., Чапланов А. М., Маркевич М. И. // Неорган. материалы. – 2003. – Т.39, №3. – С. 322-324.
3. Шур В.Я., и др. // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43, № 5. – С. 869-873.
4. Пат. 5918150 США, МПКМПК{6} H 01 L 21/3065; Nguyen Tue, Maa Jer-Shen; Sharp Microelectronics Technology; Sharp K. K. – N 08/729567; Заявл. 11.10.96; Опубл. 29.1.99; НПК 438/687.
5. Лавренко В.А. Рекомбинация атомов водорода на поверхности твердых тел. – К.: Наукова думка, 1973. – 204 с.
6. Shiraishi M., Sachse J.-U., Lemke H., Weber J. // Science and Engineering B. – 1999. – Vol.58, Issue 1-2. – P. 130-133.
7. Ливинов В.Л., Демаков К.Д. и др. // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т.37, №4. С. 473-478.
8. Дзюбенко Г.А., Лавренко В.А., Непочатов А.Н. //Журнал физической химии. – 1965. – Т. 39. – В. 10. – С. 2622-2626.
9. Галактионова Н.А. Водород в металлах. – М.: Металлургия, 1967. – 304 с.
10. Водород в металлах // Под ред. Г.Алефельда, И.Фелькеля. – М.: Мир, 1978. – Т.1. – 475 с.
11. Комник Ю.Ф. Физика металлических пленок. Размерные структурные эффекты. М.: Атомиздат, 1977. – 264 с.
12. Имашев Р.Н., Коледов В.В. и др. // ФТТ. – 2005, Т.47, №10. – С.1869-1870.
13. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Ренгенографический и электроннооптический анализ. Приложения. М.: Металлургия, 1970. – 107 с.
14. Гельд П.А., Рябов Р.А, Мохрачева Л.П. Водород и физические свойства металлов и сплавов: гидриды переходных металлов. – М.: Наука, 1985. – 232 с.

Одержано 11.10.2006

Исследовано влияние атомарного водорода на электрофизические и структурные свойства тонких пленок никеля, полученных термическим вакуумным испарением на диэлектрические подложки. Образцы обрабатывались при температуре 300÷310 К, давлении ~20 Па и концентрации атомарного водорода $10^{18}÷10^{19}м^{-3}$. Показано, что обработка пленок в среде атомарного водорода приводит к изменению их электрофизических и структурных параметров. Выявлен механизм изменения параметров пленок, объясняющий результаты исследования.

The influence of atomic hydrogen on electrophysical and structural properties of Ni thin films received by thermal vacuum evaporation on dielectrical surface was studied . The samples were processed at the temperature 300÷310 K, ~20 Pa pressure and concentration of atomic hydrogen $10^{18}÷10^{19}$ m^{-3}. It was shown that film processing in atomise hydrogen environment caused their electrophysical and structural parameters change. The film parameters changing mechanism which explains experimental results was found.

УДК 621.762

Д-р техн. наук Л. Р. Вишняков, канд. техн. наук В. П. Мороз,
канд. техн. наук Б. Н. Синайский, О. П. Яременко, В. А. Коханый, В. Т. Варченко

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, г. Киев

СТРУКТУРА И НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ МУЛЛИТА И АРМИРОВАННЫХ ИМИ КОМПОЗИТОВ С АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Рассматриваются вопросы разработки перспективных оксидных кристаллов на основе муллита, полученных методом кристаллизации из раствора в расплаве и их применение в качестве наполнителя алюминиевых матриц для создания способом вакуумно-компрессионной пропитки алюмокомпозитов триботехнического назначения.

© Л. Р. Вишняков, В. П. Мороз, Б. Н. Синайский, О. П. Яременко, В. А. Коханый, В. Т. Варченко, 2006

Введение

Современный этап развития композиционных материалов (КМ) характеризуется разработкой новых технологических схем получения армирующих элементов, оптимизацией параметров производственных процессов и требует дальнейших углубленных исследований. Остро стоит вопрос и об освоении выпуска ранее разработанных армирующих наполнителей из малодефицитного сырья, чтобы существенно расширить использование армированных ими КМ.

В Институте проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины в 1970-1980 г.г. были разработаны способы получения оксидных соединений на основе муллита, в виде игольчатых и пластинчатых кристаллов, которые предназначались для применения в КМ [1, 2]. Ожидаемая низкая стоимость таких соединений связывалась с разработкой производительной технологии и решением экологических вопросов, особенно при выделении оксидных кристаллов из продуктов плавления исходных компонентов, когда из технологии следует исключить ранее применявшиеся концентрированные кислоты.

В настоящей работе представлены результаты исследований, направленных на создание технологии получения кристаллов на основе муллита способом кристаллизации из расплава в растворе с применением растворения продукта плавления в воде и их использования в качестве наполнителя алюминиевых матриц для разработки алюмокомпозитов триботехнического назначения. Такие КМ представляют существенный интерес для ряда областей техники, где применение материалов на основе алюминия, несмотря на весовые преимущества, ограничено из-за высокой склонности алюминиевых сплавов к схватыванию с сопряженной поверхностью трения в условиях нагружения, особенно при работе без смазки [3].

Материалы и методика исследования

Для получения способом кристаллизации из расплава в растворе кристаллов муллита ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) в качестве исходного сырья использовали кремниевую кислоту, глинозем и борный ангидрид. Выбор исходных компонентов объясняется тем, что SiO_2 и Al_2O_3 являются главными муллитообразующими оксидами, а B_2O_3 выступает в роли плавня-минерализатора, который понижает температуру плавления шихты, способствует образованию кристаллов с бездефектной поверхностью и растворению застывшего монолитного расплава в воде. Шихту готовили сухим перемешиванием в барабане с фарфоровыми шарами. Подготовленную смесь загружали в графитовый тигель и плавили на установке с использованием высокочастотного нагрева. Кристаллизация происходила при скорости охлаждения расплава 10-15 град/сек. Расплав застывал в виде монолита, который в течение 48 часов отмывали горячей водой, декантируя растворившиеся бораты. В дальнейшем отмытые кристаллы просушивали до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 120 °С, получая готовый продукт.

Для определения состава и структуры кристаллов были проведены кристаллооптические, микрорентгеноспектральные и рентгенофазовые исследования. Методом микроиндентирования [4] определяли модуль их упругости и твердость.

Из полученных кристаллов были спрессованы заготовки с пористостью 48-52 %, которые подвергали пропитке алюминиевым сплавом на вакуумно-компрессионной установке [5], состоящей из вакуумной печи и автоклава. Особенностью пропитки при получении КМ является выполнение раздельных операций: расплавление алюминиевой матрицы с совмещением расплава с пористой заготовкой (в вакуумной печи) и последующее доуплотнение под давлением нейтрального газа (аргона) в автоклаве. При этом пористую заготовку укрепляли в стальной струбцине и помещали в графитовый тигель, заполненный сплавом алюминия. В наших экспериментах использовали сплав АК12 следующего состава, %: Al – основа; Mg –0,03; Mn – 0,06; Si – 11,59; Fe – 0,50; Zn – 0,21; Cu – 0,04; Ti – 0,01; Pb – 0,001. В автоклаве, куда переносили тигель с погруженной в расплаве заготовкой, создавали давление до 4 МПа в течение 30 с. Пропитанный образец после охлаждения отделяли от струбцины и механически обрабатывали. Исследованиям подвергали образцы КМ, содержащие 50-52 об.% оксидного наполнителя, на которых определяли плотность, модуль упругости, твердость и предел прочности при изгибе.

Исследование триботехнических свойств образцов КМ проводили на машине трения М-22м по схеме “вал-вкладыш” с определением износа и коэффициента трения при использовании в качестве контртела кольца из стали СТ45 с твердостью HRC 50-55 и шероховатостью поверхности R_a равной 0,63-0,32 мкм [6, 7].

Результаты исследований

Типичная структура оксидных кристаллов (рис. 1) представляет собой четырехгранные призмы, длина которых на порядок превышает размеры поперечного сечения. Методом кристаллооптического анализа установлено, что показатели преломления оксидных кристаллов h_g = 1,630; h_p = 1,610. Это соответствует аналогичным показателям твердого раствора муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ [1]. Рентгенофазовый анализ, проведенный на дифрактометре НТГ, установил наличие 90 % муллитовой фазы в твердом растворе. Качественный анализ химического состава, выполненный на установке “CAMEBAX-SX-50”, показал, что полученные кристаллы имеют неоднородный состав, в который, кроме муллита, входит алюминий и кремний. Содержание бора в кристаллах незначительно.

Результаты определения некоторых свойств полученных оксидных кристаллов на основе муллита и композита с матрицей из сплава АК12 с армирующим наполнителем представлены в табл. 1. В качестве на-

полнителя КМ использовали частицы с соотношением длины к их среднему размеру поперечного сечения, равном ~ 11. Здесь же для сравнения приведены данные по сплаву АК12. Как показывают результаты определения механических свойств (табл. 1), твердость и модуль упругости кристаллов оказались достаточно высокими. Увеличиваются также свойства КМ по сравнению с матрицей. Так, модуль упругости композита увеличился в 1,5-2,0 раза, а твердость – в 3,5 раза по сравнению с матричным сплавом АК12.

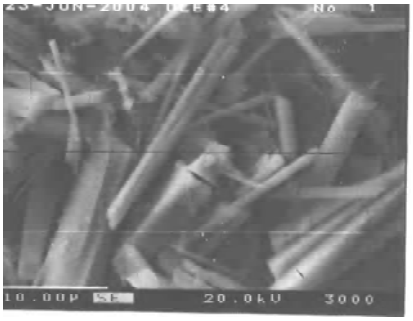


Рис. 1. Структура монокристаллов муллита

Таблица 1 – Физико-механические свойства оксидных кристаллов и алюмокомпозита на их основе

Состав	Модуль упругости E, ГПа	Твердость, ГПа	Плотность ρ, г/см^3	Предел прочности $\sigma_и$, МПа
Оксидные кристаллы	187±11	18,7±2,1	2,5-2,8	–
Сплав АК12 (матричный)	87±2	1,2±0,1	2,8	200-240
Композит: (сплав АК12 + 50 об.% кристаллов)	143±13	4,6±1,7	2,65-2,7	220-260

Известно, что для упрочнения металлокомпозитов, армированных дискретными волокнами, существенными факторами являются высокая прочность наполнителя, определенное соотношение длины к диаметру волокон и достижение достаточной прочности связи на границе раздела волокно-матрица [8]. Для исследуемого КМ можно считать справедливой формулу Келли:

$$l / d \geq \frac{(\sigma_B)_в}{2\tau},$$

где l/d – отношение длины волокна к его диаметру, $(s_B)_в$ – предел прочности волокна при растяжении, t– касательное напряжение на границе раздела волокно-матрица.

Расчет показывает, что в соответствии с этой формулой для композитов алюминий – кристаллы муллита отношение l/d не должно быть менее десяти. Для нашего случая, когда l/d =11, следовало бы ожидать упрочнения композита. Однако, как показывают результаты испытаний композита на изгиб (табл. 1), полученные кристаллы незначительно упрочнили матрицу. Это можно связать с несовершенством и недостаточной прочностью самих кристаллов либо с особенностями структуры границы раздела волокно-матрица.

Влияние структуры границ фаз на характер поведения оксидных кристаллов при разрушении изучали с использованием метода растровой электронной микроскопии с поэлементным рентгеноспектральным микроанализом. Из рассмотрения изломов образцов следует, что кристаллы распределены в матрице достаточно равномерно. При этом выявляется два характерных вида кристаллов, которые присутствуют в матрице: с сохранением исходной формы (рис. 2, ←а, ←б) и формоизмененных с разрушением путем расслоения по длине (рис. 2. ←в). В последнем случае наблюдаются признаки вытягивания кристаллов в матрице.

Анализ концентрационных профилей распределения алюминия, кислорода и кремния по сечению единичного кристалла и прилегающей к нему зоны взаимодействия с матрицей (рис. 3) позволяет заключить, что эта зона обогащена кремнием. Это можно объяснить химическим взаимодействием кристаллов на основе муллита и кремнийсодержащей матрицы, в результате чего образуются соединения, обогащенные кремнием.

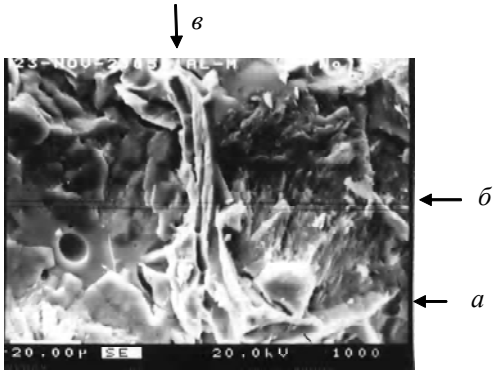


Рис. 2. Типичная микроструктура поверхности разрушения композита (РЭМ-изображение)

Несмотря на отсутствие упрочнения в исследованных КМ, применение оксидных наполнителей в алюминиевой матрице оказалось перспективным в связи с их высокой твердостью и жесткостью. Известно, что сплавы алюминия, содержащие дисперсные фазы высокой твердости, отличаются повышенным сопротивлением к схватыванию, особенно при высоких скоростях скольжения [3]. Результаты триботехнических испытаний образцов композита и матрицы АК12 приведены в табл. 2. Интенсивность износа пары трения оценивали линейным и массовым методами при сухом трении и со смазкой маслом И20. Температуру образца при трении в зоне контакта измеряли хромель-копелевой термопарой. Испытания вели при постоянной скорости скольжения (V = 1 м/с) при удельных давлениях от 0,8 до 8,0 МПа, путь трения составлял 1 км.

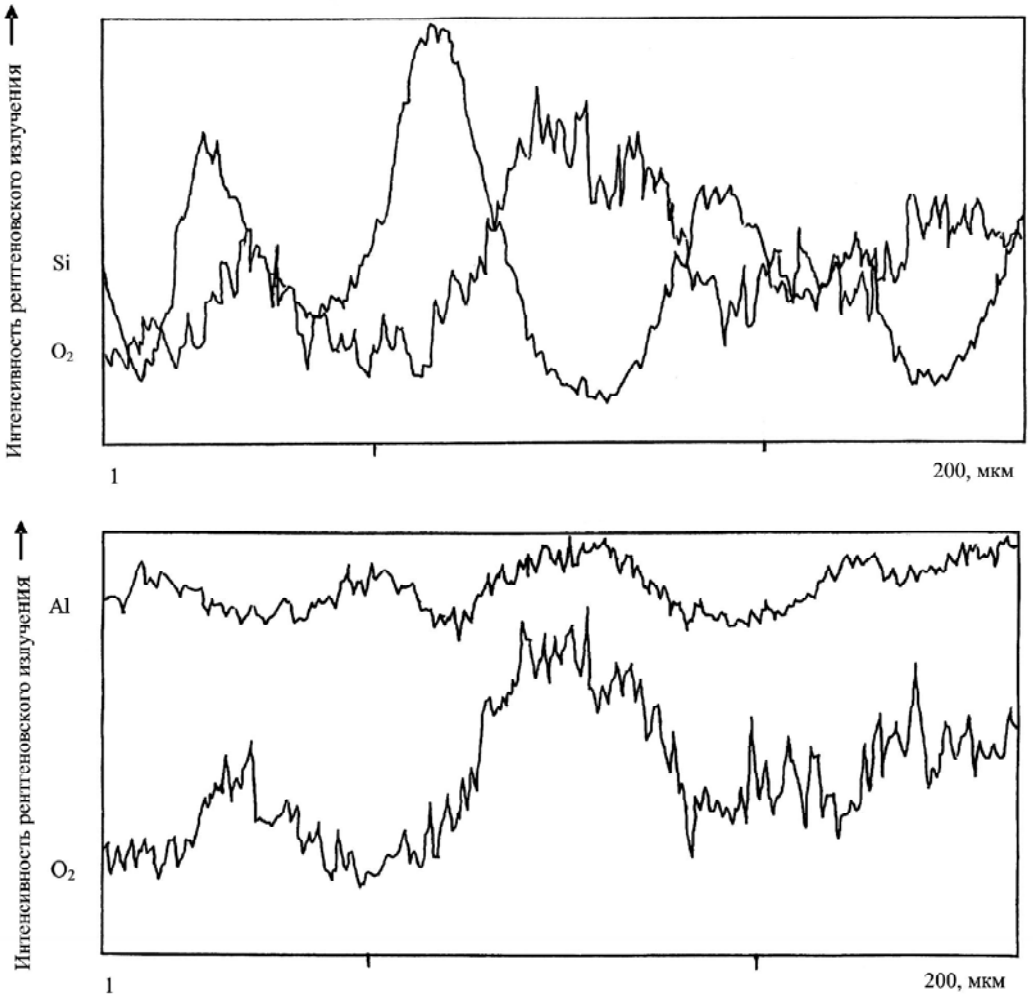


Рис. 3. Концентрационные профили распределения алюминия, кислорода и кремния по сечению кристалла и прилегающей к нему зоны взаимодействия с матрицей

Таблица 2 – Триботехнические свойства композита и матрицы АК12

№ п.п.	Состав	Скорость скольжения V, м/с	Удельное давление P, МПа	Коэффициент трения f	Линейный износ пары трения, $I_л$ мкм/км	Массовый износ образца $I_м$ г/км	Температура композита t, °С
при сухом трении							
1	Композит (АК12 + 50 % об. кристаллов)	1,0	0,8 1,6 2,4 3,2	0,41 0,44 0,54 0,55	19,0 16,0 24,0 60,0	0,53 1,46 2,8 5,6	30,0 41,0 68,0 98,0
2	Сплав АК12 (матричный)	1,0	0,8 1,6 2,4 3,2	0,52 0,51 0,44 0,45	37,0 81,0 107,0 161,0	1,6 5,3 8,3 12,2	32,0 48,0 58,0 82,0
со смазкой маслом И20							
3	Композит (АК12 + 50 % об. кристаллов)	1,0	2,0 4,0 6,0 8,0	0,16 0,14 0,127 0,105	4,5 4,5 7,5 7,5	0,17 0,15 0,10 0,10	37,0 58,0 73,0 84,0

Установлено, что при сухом трении при увеличении удельной нагрузки коэффициент трения алюмокомпозита при больших удельных давлениях (2,4; 3,2 МПа) незначительно увеличивается. В то же время износостойкость материала повышается в 2,0÷4,0 раза. На поверхности трения контртела при контакте с образцом из матричного материала при увеличенной нагрузке видны участки схватывания, наблюдаются следы пластического течения алюминиевого сплава. Такое же увеличение нагрузки на образцах композита не приводит к появлению следов схватывания за счёт образования выступов из оксидного наполнителя и вытеснения матричного материала из зоны трения. Испытания со смазкой маслом И20 при граничном трении показали существенное уменьшение коэффициента трения при одинаковых удельных давлениях. Линейный износ уменьшался в 3-4 раза, а массовый износ – в 10-15 раз.

Таким образом, установлено, что композит на основе алюминиевого сплава АК12, армированный кристаллами муллита, может эффективно работать как подшипниковый материал в паре с конструкционными сталями при скоростях скольжения 1,0 м/с и удельных давлениях до 3 МПа -для сухого трения и до 8 МПа – для трения со смазкой. Это делает разработанный КМ привлекательным для практического использования в технике.

Выводы

1. Методом кристаллизации из раствора в расплаве получены оксидные кристаллы на основе муллита $3Al_2O_3Ч2SiO_2$ с выделением кристаллов путем растворения застывшего расплава в воде, исследована их структура и некоторые свойства.

2. Методом вакуумно-компрессионной пропитки получены алюмокомпозиты, армированные оксидными кристаллами, которые имеют высокие значения твердости и модуля упругости по сравнению с алюминиевой матрицей.

3. Введение в алюминиевый сплав твердых, высокомодульных наполнителей в виде оксидных кристаллов муллита повышает износостойкость композитов, особенно при работе со смазкой, что дает основание рекомендовать полученный алюмокомпозит для использования в качестве подшипникового материала в узлах трения машин и механизмов.

Список литературы

1. Грошева В.М., Карпинос Д.М., Панасевич В.М. Синтетический муллит и материалы на его основе. – К.: Техніка, 1971. – 55 с.
2. А.с. №403281 (СССР) Способ получения монокристаллов дисперсных неорганических окисных материалов. В.И.Павликов, В.А.Артемов, С.Г. Тресвятский. – 1973.
3. Чернышова Т.А., Кобелева Л.И., Болотова Л.К.. Дискретно-армированные композиционные материалы с матрицами из алюминиевых сплавов и их трибологические свойства // Металлы, 2001, №6. – С.85-98.
4. Дуб С.Н., Новиков Н.В. Испытания твердых тел на нанотвердость // Сверхтвердые материалы, 2004, № 6. – С. 16-33.
5. Вишняков Л.Р., Кладницкий Е.И., Коханый В.А. Композиционные материалы алюминий-углеродные волокна, полученные способом вакуумно-компрессионной пропитки // Междн. конф. “Новейшие процессы и материалы в порошковой металлургии- 97”. Сб-к тез. докладов. – Киев, 264 с.
6. Полотай В.В. Машины для испытания на трение и износ // Технология и организация производства. 1970, № 6. – С. 86-88.
7. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техніка,1970. – 396 с.
8. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Новые композиционные материалы. – К.: Вища школа, 1977. – 310 с.

Одержано 26.07.2006

Розглядаються питання розробки перспективних оксидних кристалів на основі муліту, одержаних методом кристалізації з розчину в розплаві та їх використання як наповнювача алюмінієвих матриць для створення методом вакуумно-компресійного просочування алюмокомпозитів триботехнічного призначення.

The questions of perspective oxide crystals development on mullite base was studied. These crystals were received by crystallization method from solution in melt and their application as Al matrix filling for Aluminium composite of tribotechnical purpose produced by vacuum compression impregnation method.

УДК 621.74.04+621.746.6+621.74.01

Канд. техн. наук В. В. Наумик

Национальный технический университет, г. Запорожье

ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК И СЛИТКОВ В ВАКУУМЕ

Рассмотрена роль теплопроводности системы "металл-форма-охлаждающая среда" в процессе кристаллизации при различных методах получения отливок и слитков в вакууме.

Известно, что в процессе первичной кристаллизации металла или сплава в форме во многом определяется его окончательная структура, а следовательно, и весь комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств изделия.

По мере развития современных высокотехнологичных отраслей машиностроения и соответствующего повышения уровня требований к деталям и элементам конструкций, все большее значение приобретает возможность получения заданно-ориентированной структуры в отливках, непрерывнолитых профилях (например, из антифрикционных материалов) и литых заготовках, подлежащих дальнейшей обработке давлением.

Направление роста кристаллов в процессе формирования первичной структуры отливок и слитков обеспечивается градиентом температур в заданном направлении. Величина градиента определяется интенсивностью направленного теплоотвода от кристаллизующегося металла, через форму, в окружающую форму, охлаждающую среду, а также интенсивностью отвода тепла от последней.

Таким образом, металл в форме, саму форму и окружающую среду, обеспечивающую отвод тепла от неё, можно рассматривать, как единую, взаимосвязанную систему, определяющую особенности кристаллизации отливки или слитка.

В общем случае, процесс теплопередачи осуществляется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. В процессе формирования структуры отливки или слитка в системе "металл-форма-охлаждающая форму среда", в особенности в случае проведения процесса в вакууме, определяющей является теплопроводность.

Рассмотрим роль теплопроводности вышеуказанной системы в процессе формирования заданно-ориентированной структуры при различных методах получения отливок и слитков в вакууме.

В авиационном и энергетическом машиностроении для получения прецизионных отливок из жаропрочных никелевых сплавов с заданно-ориентированной структурой распространен метод высокоскоростной направленной кристаллизации. При этом керамическая литейная форма 1, наполненная жидким расплавом, погружается в ванну с жидким алюминием 2, выполняющую роль кристаллизатора (рис.1) [1]. Следовательно, градиент температур, задающий направление роста кристаллов в отливке, определяется в первую очередь теплопроводностью жидкого алюминия, в который погружается залитый блок, а также теплопроводностью керамической литейной формы и самого никелевого сплава в форме.

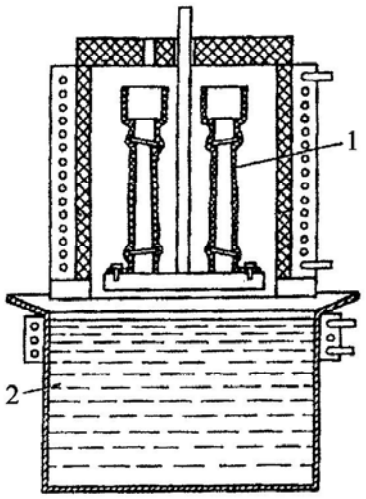


Рис. 1. Схема установки для направленной кристаллизации с охлаждением в расплаве легкоплавкого металла

По технологии, разработанной в Запорожском национальном техническом университете [2], слитки из медных сплавов получают в графитовой тигель-форме 1 с применением медного водоохлаждаемого поддона 2 (рис. 2). При этом градиент температур, задающий направление роста кристаллов в слитке, определяется соответственно теплопроводностью меди – материала водоохлаждаемого поддона, графита – материала тигель-формы и медного сплава, залитого в неё.

© В. В. Наумик, 2006

В случае получения непрерывнолитых профилей из медных сплавов теплоотвод осуществляется медным водоохлаждаемым кристаллизатором 2 через графитовую вставку 1 (рис. 3). При этом, как и в предыдущем случае, градиент температур и направленность роста кристаллов в слитке определяются теплопроводностью материала кристаллизатора, графита и самого медного сплава.

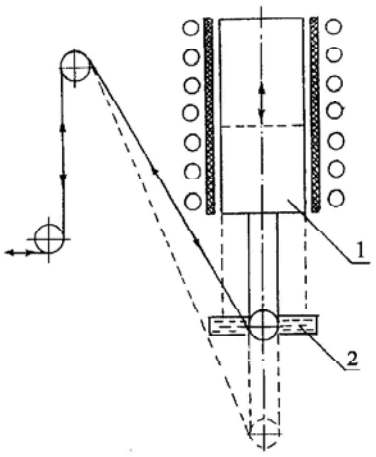


Рис. 2. Схема модернизированной вакуумной электропечи, предназначенной для получения высококачественных слитков из отходов меди

Прямое измерение теплопроводности в исследованиях встречается редко по причине сложности этого процесса. Более распространена косвенная оценка теплопроводности металлов по их электропроводности, основанная на известных соотношениях Видемана-Франца и Лоренца [3]. Однако данный метод не обеспечивает достаточной точности производимых измерений, поскольку при этом учитывается только одна составляющая полной теплопроводности металла – электронная, имеющая общую природу с электропроводностью, и не учитывается решеточная теплопроводность, определяемая структурой испытуемого материала.

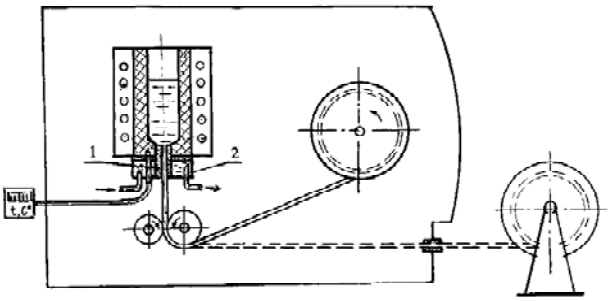


Рис. 3. Схема модернизированной вакуумной электропечи, предназначенной для получения непрерывнолитых профилей из медных сплавов

Достаточно точное измерение полной (электронной и решеточной) теплопроводности материала возможно только путем проведения прямого эксперимента.

В Запорожском национальном техническом университете разработано и изготовлено специальное устройство для экспериментального определения теплопроводности металлов стационарным методом [4]. Особенность данного метода состоит в том, что температура в отдельных точках образца не изменяется в процессе проведения эксперимента.

С помощью разработанной установки экспериментально были определены коэффициенты теплопроводности некоторых чистых материалов. Полученные результаты в достаточной степени согласуются со справочными данными (коэффициент корреляции $r = 0{,}99$) (табл. 1).

Также был определен коэффициент теплопроводности жаропрочного никелевого сплава – материала газотурбинных лопаток, получаемых методом высокоскоростной направленной кристаллизации (табл. 1).

Был проведен комплекс исследований, в ходе которых определены коэффициенты теплопроводности 13-ти образцов алюминия жидкометаллического кристаллизатора, отобранных после каждых трех циклов процесса высокоскоростной направленной кристаллизации жаропрочных никелевых сплавов [5]. Измере-

Таблица 1 – Коэффициенты теплопроводности основных материалов, определяющих градиенты температуры при получении отливок и слитков с заданно-ориентированной структурой

Металл	Температура определения теплопроводности, К	Теплопроводность,λ, Вт / (м·К)	
		экспериментальная	по справочным данным
Cu	300	399,2	401,2
Al	295	226,7	221,5
Fe	298	71,3	74,0
Ni-сплав	333	61,72	–
Al кристаллизатора 3 плавки	373	194,7	–
	673	141	–
	1473	73,4	–
Al кристаллизатора 39 плавок	373	114,8	–
	673	45	–
	1473	16,9	–

ния проводили при 100, 200, 300 и 400 °С. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением количества проведенных плавок теплопроводность уменьшается по степенной зависимости и после 39 циклов снижается более чем в 4 раза.

Однако наибольшее практическое значение для процесса высокоскоростной направленной кристаллизации имеет теплопроводность алюминия в жидком состоянии при температурах соответствующих кристаллизации отливок из жаропрочных никелевых сплавов.

Известно, что при плавлении металлов резко возрастают амплитуды колебаний атомов, исчезает дальний порядок и возрастает общий позиционный беспорядок. Всё это приводит к скачкообразному увеличению рассеяния электронов и соответствующему снижению электропроводности и теплопроводности [6].

Поскольку экспериментальное определение теплопроводности жидких металлов связано с большими трудностями и не обеспечивает достаточной точности, вполне корректной является косвенная её оценка по табличной величине электропроводности при соответствующей температуре с использованием соотношений Видемана-Франца и Лоренца.

Известно, что электропроводность алюминия при плавлении снижается в 2,2 раза [6].

Теплопроводность твердых образцов алюминия жидкометаллического кристаллизатора при температуре плавления (660 °С) определяли аппроксимированием.

Для определения коэффициентов в соотношении Видемана-Франца-Лоренца были использованы литературные данные по теплопроводности и электропроводности алюминиевых сплавов с теплопроводностью, близкой к материалу опытных образцов [7].

Коэффициенты теплопроводности жидкого алюминия при температуре кристаллизации жаропрочного никелевого сплава для соответствующих образцов жидкометаллического кристаллизатора (табл.1) рассчитывали используя зависимость электропроводности жидкого алюминия от температуры, выведенную на основании литературных данных [6].

Основной огнеупорной составляющей керамической формы при изготовлении отливок с направленной кристаллизацией из жаропрочных никелевых сплавов является электрокорунд. Согласно литературным данным [8], коэффициент его теплопроводности определяется следующей зависимостью:

$$\lambda = 2{,}09 + 0{,}0016 \cdot t\ ^\circ\text{C}. \qquad (1)$$

Коэффициент теплопроводности графита – материала тигель-формы и вставки определяется соотношением [8]

$$\lambda = 140 - 0{,}035 \cdot t\ ^\circ\text{C}. \qquad (2)$$

Анализ приведенных зависимостей, а также экспериментальных данных подтверждает, что теплопроводность металлических материалов и графита определяется её электронной составляющей и потому с повышением температуры снижается в связи с увеличением рассеяния электронов на узлах решетки. Для коэффициента теплопроводности керамики как неметаллического материала определяющей является его решеточная составляющая и с повышением температуры он повышается, поскольку увеличивается амплитуда колебаний атомов.

Описанные литературные и экспериментально полученные зависимости теплопроводности как одного из основных теплофизических свойств материалов, используемых при осуществлении различных технологических процессов, позволяют аналитически просчитать градиенты температур, возникающие в каждом конкретном случае. Это в свою очередь дает возможность спрогнозировать структуру получаемых отливок и слитков, а следовательно, и уровень их физико-механических и эксплуатационных свойств, что крайне важно при разработке сложных технологических процессов.

Список литературы

1. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
2. Рациональная ресурсосберегающая технология получения высококачественных слитков из отходов меди / Бялик Г.А., Наумик В.В., Адамчук С.И., Лунёв В.В. // "Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні", № 1, 2005. – С. 104-111.
3. Мискар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: "Мир". – 1968. – 464 с.
4. Деклараційний патент України № 4291 МПК 7601 № 25/18 (Видано 17.01.05) Наумик В.В., Бялік Г.А., Луньов В.В. Пристрій для визначення теплопровідності зразка матеріалу.
5. Наумик В.В. Изменение теплофизических свойств жидкометаллического кристаллизатора в процессе его эксплуатации при вакуумном литье жаропрочных сплавов // Проблеми трибології, 2006, № 1. – С. 31-35.
6. Ершов Г.С. Строение и свойства жидких и твердых металлов / Г.С.Ершов, В.А.Чистяков. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
7. Нильсен Х. Алюминиевые сплавы [Справочник] / Отв. ред. Х. Нильсен и др.; Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 678 с., ил.
8. Справочник машиностроителя по ред. М.А. Саверина Т.1. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951. – 1035 с.

Одержано 12.09.2006

Розглянуто роль теплопровідності системи "метал-форма-охолоджувальне середовище" в процесі кристалізації при різних методах отримання відливків та зливків у вакуумі.

The role of heat conduction in system "metal-form-cooling environment" during crystallization process at different methods of cast and ingots receiving in vacuum was shown.

II КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 669.017

Канд. техн. наук А. И. Буря, Г. В. Козлов

Государственный аграрный университет, г. Днепропетровск

ФРАКТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРУГОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ НАГРУЖЕНИЯ

Показана существенно различающаяся роль флуктуационного свободного объема f_c при упругой деформации в случае растяжения и сжатия. Если в первом случае его роль незначительна и принятие аппроксимации f_c = const дает допустимое расхождение теории и эксперимента, то в случае сжатия требуется использование точных величин f_c и указанная выше аппроксимация может дать большое (до 40 %) расхождение теории и эксперимента.

Модуль упругости E является одной из наиболее важных механических характеристик полимерных композитов. Часто введение наполнителя в полимер определяется соображениями создания высокомодульного полимерного материала [1]. В рамках континуального подхода существует большое число моделей, дающих количественное описание величины E как функции характеристик полимерной матрицы и наполнителя [2]. Поскольку все эти модели разрабатывались применительно к какому-либо конкретному случаю, они не в состоянии описать структуру межфазных слоев полимер – наполнитель, распределение, размер и форму частиц наполнителя [2]. Поэтому в последнее время для указанных целей все чаще используются современные физические концепции – синергетика и фрактальный анализ [3, 4]. Так, в рамках последнего, для дисперсно-наполненных полимерных композитов было показано, что величина E линейно увеличивается по мере повышения размерности D_f областей локализации избыточной энергии, "закачиваемой" в полимерную матрицу при введении наполнителя, что аналитически выражается следующим образом [4]:

$$E = C\,(D_f - 3),\ \text{ГПа} \qquad (1)$$

где C – константа, равная ~ 0, 67.

Однако авторы [5] показали, что хотя для углепластиков на основе фенилона и существует зависимость $E(D_f)$, но в случае испытаний на сжатие она выражается квадратным соотношением, а именно:

$$E = 3{,}70(D_f^{1/2} - 1),\ \text{ГПа} \qquad (2)$$

Поэтому целью настоящей работы является выяснение причин разного характера зависимостей $E(D_f)$ для полимерных композитов, наполненных дисперсными частицами и короткими волокнами.

В качестве полимерного связующего использован ароматический полиамид – фенилон [6], а в качестве наполнителя – углеродное волокно (УВ) диаметром 7-9 мкм и длиной 3 мм. Содержание УВ составляло 15 мас.%. Композит готовили "сухим" способом, включающим смешение компонентов во вращающемся электромагнитном поле. Для этого в реактор загружали порошкообразный полимер, УВ и неравноосные ферромагнитные частицы длиной 40 мм. Далее реактор помещали в расточку генератора электромагнитного аппарата. Под воздействием вращающегося электромагнитного поля ферромагнитные частицы начинают вращаться, сталкиваясь между собой, в результате чего УВ равномерно (хаотически) распределяются в полимерной матрице. В результате соударений частицы истираются и продукты износа попадают в композицию. Для удаления ферромагнитных частиц после смешения использовали два метода: магнитной и механической сепарации [7].

Образцы для исследования механических свойств готовили методом горячего прессования при температуре 603 К и давлении 55 МПа. Испытания на сжатие выполнены на машине FP-100 при температуре 293 К и скорости деформации 10^{-3} $с^{-1}$.

Рассмотрим способы расчета необходимых для дальнейшего анализа параметров. Величина D_f определена из следующего уравнения [8]:

$$D_f = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}, \qquad (3)$$

где ν – коэффициент Пуассона, величина которого оценивалась по результатам механических испытаний с помощью соотношения [9]:

$$\frac{\sigma_T}{E} = \frac{1-2\nu}{6(1+\nu)}, \qquad (4)$$

где σ_T – предел текучести.

© А. И. Буря, Г. В. Козлов, 2006

Величину предела текучести при растяжении σ_T^p можно рассчитать по аналогичным величинам при сжатии $\sigma_T^{сж}$ согласно уравнения [9]:

$$\frac{\sigma_T^p}{\sigma_T^{сж}} = \frac{(1-\nu^2)^{1/2} - \nu}{(1+\nu^2)^{1/2} + \nu}. \qquad (5)$$

Уравнение (5) учитывает тот факт, что величина ν является структурной характеристикой и не зависит от схемы нагружения [8]. Далее величину модуля упругости при растяжении можно рассчитать по уравнению (4) при условии $\sigma_T = \sigma_T^p$. Кроме того, соотношение между E и σ_T в рамках концепции ангармонизма записывается следующим образом [9]:

$$\sigma_T = \frac{E}{6\gamma}, \qquad (6)$$

где γ – параметр Грюнайзена межмолекулярных связей, который связан с коэффициентом Пуассона уравнением [10]:

$$\gamma = A\frac{(1+\nu)}{1-2\nu}. \qquad (7)$$

В уравнении (7) коэффициент A варьируется в пределах 0,7-0,9 [10]. Полагая $A = 0{,}9$, авторы [4] из сочетания уравнений (5)-(7) получили следующее соотношение:

$$E = (8{,}1D_f - 10{,}8)\,\sigma_T.$$

На рис. 1 приведено сравнение экспериментальных и рассчитанных согласно уравнению (8) зависимостей $E(D_f)$ при растяжении и сжатии для обеих серий исследуемых углепластиков. Как можно видеть, если в случае растяжения получено хорошее соответствие теории и эксперимента, то в случае сжатия эти зависимости различаются не только количественно, но и качественно: уравнение (8) дает $E \sim D_f$, а экспериментальная кривая – $E \sim D^{1/2}_f$.

Одной из возможных причин расхождения теории и эксперимента может быть использование при выводе уравнения (8) аппроксимации $A = \text{const} = 0{,}9$ [4]. Строго говоря [10], величина коэффициента A является функцией относительно флуктуационного свободного объема, что выражается следующим уравнением:

$$A = \frac{2}{9}\ln\left(\frac{1}{f_c}\right). \qquad (9)$$

Оценить величину f_c можно следующим образом [10]:

$$f_c \approx 0{,}017\left(\frac{1+\nu}{1-2\nu}\right). \qquad (10)$$

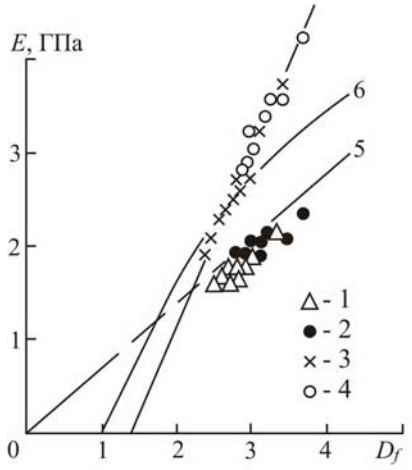


Рис. 1. Зависимости модуля упругости E от размерности областей локализации избыточной энергии в испытаниях на растяжение (1, 2, 5) и сжатие (3, 4, 6) для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1, 3) и механической (2, 4) сепарации. 1-4 – расчет по уравнению (8); 5, 6 – экспериментальные данные

Далее, если предположить, что постоянный коэффициент 8,1 в уравнении (8) является переменной величиной, то его можно обозначить как K и рассчитать из этого уравнения, используя экспериментальные значения E и σ_T, полученные в испытаниях на сжатие, а также определенные согласно уравнения (3) величины D_f. На рис. 2 показана корреляция между K и A, которая оказалась линейной и аналитически выражается эмпирическим уравнением:

$$K = 10{,}8\,A. \qquad (11)$$

Подстановка уравнения (11) в соотношение (8) позволяет получить уточненный вариант последнего:

$$E = 10{,}8\,(A\,D_f - 1). \qquad (12)$$

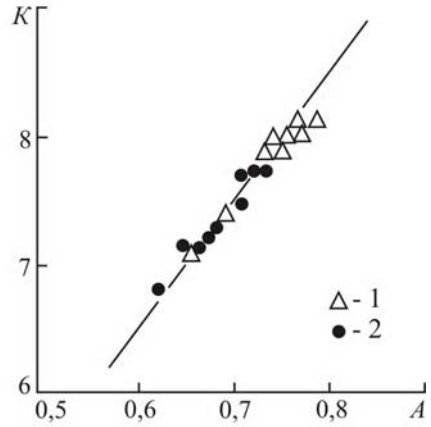


Рис. 2. Соотношение между коэффициентами K и A для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепарации в испытаниях на сжатие

На рис. 3 приведено сравнение экспериментальных и рассчитанных по уравнению (12) зависимостей $E(D_f)$ для испытаний на сжатие. Как можно видеть, теперь получено превосходное соответствие теории и эксперимента (расхождение менее 3 %). Сравнение уравнений (8) и (12) указывает на существенно различающуюся роль флуктуационного свободного объема в испытаниях на растяжение и сжатие. Если в первом случае роль f_c незначительна и поэтому аппроксимация A = const дает хорошее соответствие теории и эксперимента (рис. 1), то в случае сжатия использование такой аппроксимации при вариации в пределах 0,027-0,060 может привести к существенному (до 40%) расхождению экспериментальных и теоретических значений E. Тот факт, что увеличение f_c согласно уравнению (9) снижает А и, следовательно, согласно соотношению (12) уменьшает E происходит деформация именно микрополостей флуктуационного свободного объема и только после этого упруго деформируется структура углепластиков.

В заключении отметим, что уравнение (1) было получено для схемы нагружения на изгиб. Применение такой же схемы для углепластиков с учетом, что величины σ_T и E при изгибе равны полусумме аналогичных величин при растяжении и сжатии, дает линейное соотношение между E и D_f вида:

$$E = 1{,}40(D_f - 1),\ \text{ГПа} \qquad (12)$$

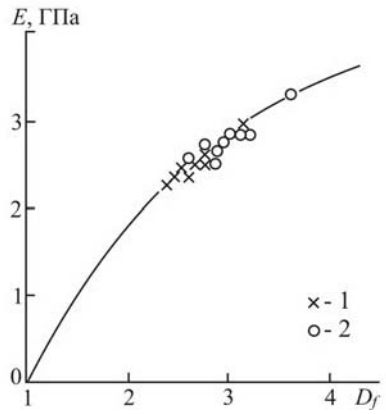


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (1, 2) и рассчитанных (3) по уравнению (12) зависимостей модуля упругости E от размерности областей локализации избыточной энергии D_f в испытаниях на сжатие для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепарации

Кроме того, для случая изгиба было получено достаточно хорошее соответствие (среднее расхождение ~ 10 %) экспериментальных и рассчитанных по уравнению (8) величин E.

Таким образом, результаты настоящей работы показали существенно различающуюся роль флуктуационного свободного объема при упругой деформации в случае растяжения и сжатия. Если в первом случае его роль незначительна и принятие аппроксимации f_c = const дает допустимое расхождение теории и эксперимента, то в случае сжатия требуется использование точных величин f_c или коэффициента A в уравнении (7), а указанная выше аппроксимация может дать большое расхождение (до 40 %) теории и эксперимента.

Список литературы

1. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композитов. – М.: Химия, 1978. – 310 с.
2. Ahmed S., Jones F.R. A review of particulate reinforcement theories for polymer composites // J. Mater. Sci., 1990. – Vol. 25. – №12. – P. 4933-4942.
3. Бобрышев А.Н., Козомазов В.Н., Бабин Л.О., Соломатов В.И. Синергетика компози-ционных материалов. – Липецк, НПО ОРИУС, 1994. – 154 с.
4. Новиков В.У., Козлов Г.В. Фрактальная параметризация структуры наполненных полимеров // Механика композиционных материалов, 1999. – Т. 35. – №3. – С. 269-290.
5. Буря А.И., Козлов Г.В., Ваньков А.Ю. Взаимосвязь структуры и модуля упругости для углепластиков на основе фенилона // Новости науки Приднепровья, 2004. – №3. – С. 33-36.
6. Фенилон – термостойкий ароматический полиамид / Соколов Л.Б., Кузнецов Г.А., Герасимов В.Д., Фоменко Л.Н., Кудим Т.В., Савинов В.М., Саенко А.Д., Гудимов М.М., Хруслова Н.В., Бейдер ЭЛ., Трофимович А.Н., Приходько О.Г. // Пластические массы, 1967. – №9. – С. 21-23.
7. Буря А.И., Козлов Г.В. Структурные аспекты трения и износа углепластиков на основе фенилона // Трение и износ, 2003. – Т. 24. – №3. – С. 279-283.
8. Баланкин А.С. Синергетика деформируемого тела. М.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1991. – 404 с.
9. Козлов Г.В., Сандидов Д.С. Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров. Новосибирск: Наука, 1994. – 261 с.
10. Сандидов Д.С., Козлов Г.В. О природе флуктуационного свободного объема жид-костей и стекол // Физика и химия стекла, 1996. – Т. 22. – №2. – С. 97-106.

Одержано 3.07.2006

Показано роль флуктуаційного вільного об'єму f_c, що суттєво відрізняється при пружній деформації, у випадку розтягнення та стиснення. Якщо в першому випадку його роль незначна й прийняття апроксимації f_c = const дає припустиме розходження теорії й експерименту, тоді у випадку стиснення необхідне використання точних величин f_c і вказана вище апроксимація може дати значне (до 40 %) розходження теорії й експерименту.

The significantly different role of free fluctuation volume f_c during elastic deformation in case of strain and compression was shown. If in the first case it's role is insignificant and taking the approximation f_c = const gives permissible difference of theory and experiment then in case of compression it requires the exact values fc using and the abovementioned approximation can give large (above 40 %) difference of theory and experiment.

УДК 669.14:543

Д-р техн. наук О. М. Шаповалова, А. В. Калинин

Национальный университет, г. Днепропетровск

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА МОДИФИКАТОРАМИ-РАСКИСЛИТЕЛЯМИ НА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КРЕМНЕМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

Исследованы неметаллические включения в исходной и модифицированной стали 17Г1С в литом и деформированном состоянии. Микроструктурно определена морфология сульфидных включений и проведен их микрорентгеноспектральный анализ. Рассчитано объемное содержание включений до и после модифицирования.

Введение

Вопросы образования и распределения неметаллических включений представляют научный и практический интерес, поскольку они тесно связаны с составом стали, технологией выплавки и условиями кристаллизации. Сульфидные и нитридные включения резко влияют на технологические, механические и служебные свойства стали. В связи с производством всё более крупных слитков, при их кристаллизации образуются крупные включения и их скопления в ликвационных зонах [1, 2]. В деформированном металле они приобретают вид тонких нитей или пластин, что понижает свойства образцов в продольном и поперечном направлениях деформации. Поэтому вопрос о возможности воздействия на форму неметаллических включений в деформированной стали приобретает особую важность.

Повлиять на природу и форму включений в литой и деформированной стали можно, используя такие модификаторы, как Zr, РЗМ. Однако это дорогостоящие способы воздействия; технология же модифицирования РЗМ разработана для малосернистых сталей (< 0,15 %S). При модифицировании Zr образуется карбосульфидная эвтектика, которая способствует после затвердевания образованию макро- и микротрещин в слитке [3].

Целью данной работы являлось установление влияния обработки модифицирующими добавками на количество и состав неметаллических включений в стали 17Г1С.

Материал и методика исследования

Материалом исследования служила литая и деформированная низколегированная сталь 17Г1С**,** широко применяемая в машиностроении для изготовления крупногабаритных изделий, строительных конструкций ответственного назначения, а также для газопроводных труб большого диаметра.

Химический состав стали 17Г1С приведен в табл.1.

Таблица 1 – Химический состав стали 17Г1С

Марка стали	Содержание элементов, % мас.							
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	S	P
17Г1С	0,18	0,40	1,15	0,30	0,30	0,25	0,04	0,03

Опытно-промышленные плавки стали 17Г1С проводили в индукционной печи марки ИСТ-0,15 с контролем температуры W-Mo-термопарой погружения с точностью ±10 °С. Раскисление проводили порошкообразным силикокальцием. Температура выпуска из печи 1650 °С.

Внепечное модифицирование проводили в разливочном ковше, на дно которого перед заливкой подавали брикеты комплексного модификатора-раскислителя в количестве 0,2…0,5 % от массы расплава [4], содержащего отходы Ti, Al, Mg, Ca. Полученные отливки проковывали на прутки размерами 20×20×1200 мм. После термической обработки (нормализация при 880 °С) от литого и деформированного металла отбирали пробы для химического анализа и вырезали образцы для механических испытаний. Определение содержания неметаллических включений проводили металлографическим методом с использованием компьютерной программы обработки экспериментальных данных.

Исследование структуры и фазового состава неметаллических включений в стали 17Г1С до и после модифицирования проводили на растровом электронном микроскопе ISM-6360LA с системой для проведения микрорентгеноспектрального анализа.

© О. М. Шаповалова, А. В. Калинин 2006 р.

Анализ полученных результатов

В исходной литой стали 17Г1С основным видом неметаллических включений являются сульфиды и оксисульфиды марганца, на их долю приходится 85...90 % всех включений. Сульфиды выделяются в различных морфологических видах: глобулярные (35…45 % от общего количества), плёночные (25…30%) и огранённые (30…40 %) по данным [3]. Глобулярные сульфиды выделяются в начале кристаллизации. В затвердевшей стали они находятся произвольно, неупорядоченно: могут находиться как внутри, так и на периферии дендритных ветвей.

Плёночные сульфиды формируются из последних порций жидкости в результате реакции: Ж $\rightarrow$ А + MnS, располагаясь по границам дендритных ветвей в виде цепочек мелких включений, скоплений и плёнок. Такая форма и расположение включений неблагоприятно влияет на механические свойства стали, особенно на пластичность и ударную вязкость. Огранённые сульфиды выделяются из жидкой стали при кристаллизации и располагаются неупорядоченно.

Содержание Mn, S, Fe, Si, и O_2 в глобулярных, плёночных и огранённых включениях сульфида марганца приведено на рис. 1. Глобулярные и огранённые сульфиды состоят на 92…95 % из Mn и S при соотношении Mn: S = 1,7...1,8; остальное – Fe. Глобулярные сульфиды, кроме Mn и S содержат до 0,4 % Si и 3,5…4,5 % O_2; их можно отнести к оксисульфидным включениям.

При модифицировании количество неметаллических включений в стали 17Г1С уменьшается в 2,0...2,2 раза как в литом, так и в кованом состояниях (табл. 2). Значения дисперсии, среднеквадратичного отклонения и коэффициента вариации, характеризующие рассеивание, в модифицированной стали уменьшились.

Таблица 2 – Количество неметаллических включений в стали 17Г1С в литом и кованом состояниях

Состояние стали		Количество НВ, % объемн.						
		i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	$\bar{i}$
Литая	немодифицированная	0,026	0,029	0,021	0,032	0,030	0,032	0,028
	модифицированная	0,012	0,014	0,014	0,013	0,012	0,014	0,013
Кованая	немодифицированная	0,035	0,032	0,041	0,043	0,030	0,031	0,035
	модифицированная	0,015	0,018	0,016	0,018	0,019	0,017	0,017

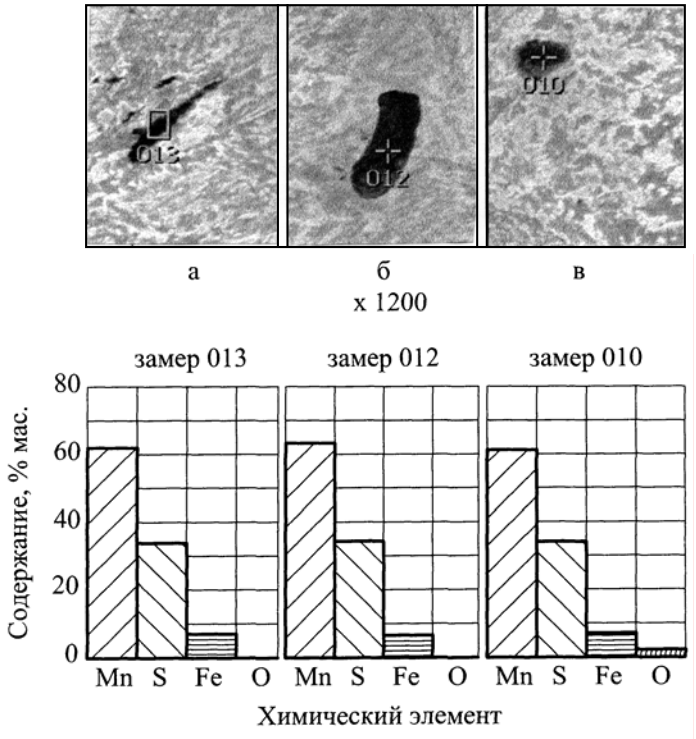


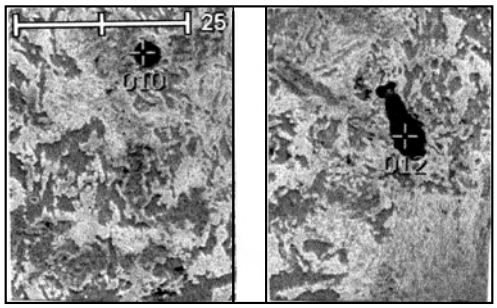
Рис. 1. Содержание Mn, S, Fe и O в пленочных (а), ограненных (б) и глобулярных (в) неметаллических включениях в немодифицированной стали 17Г1С

Модифицирование оказывает положительное влияние на размеры и форму неметаллических включений, снижая размер включений с 4-5 до 1-2 баллов (ГОСТ 1778-80).

В модифицированной стали 17Г1С количество ограненных и особенно пленочных сульфидов марганца значительно уменьшается, сульфиды (Mn,Fe)S измельчаются и имеют более сложный химический состав (рис. 2). Как видно из рисунка, кроме марганца, железа и серы, включения дополнительно содержат титан, алюминий, кремний, кислород, что является следствием обработки стали модификаторм-раскислителем.

Отличительной особенностью модифицированной стали является появление в структуре нитридов титана, которые находятся как самостоятельная фаза, так и в виде сложного двойного включения с сульфидом марганца (рис. 3).

При деформации глобулярные включения приобретают форму эллипсов и овалов, ограненные включения вытягиваются в строчки. Знание формы и фазового состава включений позволяет прогнозировать качество стали, в том числе деформируемость, и оценивать их влияние на механические характеристики стальных заготовок: анизотропию свойств, пластичность и вязкость.



а б

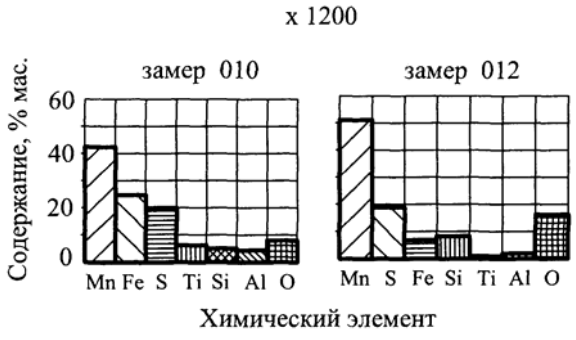


Рис. 2. Содержание Mn, S, Fe, Ti, Si, Al и O в глобулярном (а) и ограненном (б) неметаллических включениях в модифицированной стали 17Г1С

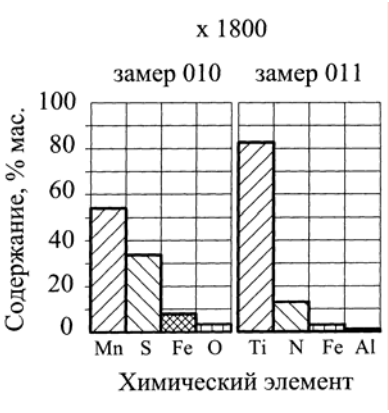


Рис. 3. Содержание элементов в двойном неметаллическом включении (Mn,Fe)S + TiN в модифицированной стали 17Г1С

Заключение

Исследованы количество, форма и химический состав неметаллических включений в исходной и обработанной модификаторами-раскислителями стали 17Г1С в литом и деформированном состояниях.

Установлено, что модифицирование в 2,0...2,2 раза снижает количество неметаллических включений и увеличивает их дисперсность. В модифицированной стали появляются нитриды титана, а сульфиды марганца имеют более сложный химический состав с наличием в них титана, алюминия, кремния.

Список литературы

1. Лунев В.В., Аверин В.В. Сера и фосфор в стали. – М.: Металлургия, 1988. – 246 с.
2. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
3. Ицкович Г.М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений. – М.: Металлургия, 1981. – 277 с.
4. Деклараційний патент 53197А України, МКІ С22С35/00. Комплексний розкислювач для обробки сталей і сплавів та спосіб його одержання / О.М. Шаповалова, О.В. Шаповалов, О.В. Калінін. Опубл. в 2003р., бюл. №1.

Одержано 11.10.2006

Досліджені неметалеві включення у вихідній та модифікованій сталі 17Г1С у литому та деформованому стані. Мікроструктурно визначено морфологію сульфідних включень та проведено їх мікрорентгеноспектральний аналіз. Розраховано об'ємний вміст включень до і після модифікування.

The nonmetallic inclusions in basic and modified steel 17Г1С as cast and deformed state were studied. The morphology of sulphide inclusions was microstructionally defined and their micro x-ray spectral analysis was made. The volume content of inclusions before and after modification was counted.

III ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.762: 666.764.4

Д-р техн. наук Л. Р. Вишняков, канд. техн. наук Б. Н. Синайский,
канд. техн. наук В. П. Мороз, Э. П. Косыгин, А. В. Нешпор,
Е. Ю. Чижаньков, В. Т. Варченко

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, г. Киев

ПОЛУЧЕНИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИЛИЦИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

Рассматриваются задачи получения и исследования механических и триботехнических свойств силицированного композиционного материала на основе термически расширенного графита для деталей, работающих в узлах трения.

Введение

Силицированный графит является высокотемпературным композиционным материалом с высокими триботехническими характеристиками для работы в коррозионных средах. Силицирование графита происходит при пропитке пористых графитовых структур кремниевым расплавом или его парами. При этом в зависимости от вида и природы исходного графита, пористости структуры могут быть реализованы различные комбинации нужных эксплуатационных свойств карбида кремния и графита [1, 2].

Известно, что термически расширенный графит (ТРГ), получаемый путем химической и термической обработки природного графита, обладает способностью к формованию при комнатной температуре без введения в него дополнительного связующего, что позволяет изготавливать графитовые материалы с регулируемыми показателями пористости и прочности [3]. В связи с этим представляет интерес использование ТРГ как пористой графитовой структуры для получения силицированного графита и изучения его механических и триботехнических свойств.

Материалы и методика исследования

Разработана и исследована лабораторная технология изготовления силицированного композиционного материала на основе ТРГ [4]. Для силицирования были использованы образцы ТРГ с плотностью в пределах 0,25-1,75 г/см^3. Образцы размерами 90×40×10 мм изготавливали методом одностороннего прессования из ТРГ с насыпной массой 5,9 г/дм^3 из графита марки ГСМ Завальевского графитового комбината. Для получения открытой регулируемой пористости, что необходимо для последующего насыщения кремнием, перед прессованием в порошок ТРГ вводили порообразователь – гидрокарбонат аммония. Прессование образцов с порообразователем проводили при давлении в диапазоне 10-100 МПа. Порообразователь удаляли из прессовок термообработкой в сушильном шкафу при температуре 70 °С.

Полученные образцы силицировали в парах кремния в индукционной печи. Для проведения процесса была использована специализированная установка на базе индукционной печи с графитовым тиглем (рис. 1). В тигле размещался герметически закрытый контейнер из графита, в нижней части которого располагали кремний. Образцы устанавливали на решетку, размещенную в контейнере. При нагреве индукционной печи до необходимой температуры кремний расплавлялся, и пары его через газоход выносились в камеру, где образцы насыщались кремнием. Для защиты образцов ТРГ от окисления в газоход подавался газ – азот.

Силицирование в парах кремния происходило с постепенным повышением температуры до 1200 °С для снятия остаточных напряжений, удаления остатков порообразователя и технологических примесей. Затем температуру поднимали до 1800 °С, при которой образцы выдерживали один час. На этой стадии проходило интенсивное испарение кремния и пропитка им объема исследуемых образцов ТРГ с одновременным образованием карбида кремния.

Фазовый состав образцов силицированного ТРГ определяли методом рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра типа НТГ. Микроструктуру исследовали с помощью растрового электронного микроскопа CAMEBAX – SX-50.

© Л. Р. Вишняков, Б. Н. Синайский, В. П. Мороз, Э. П. Косыгин, А. В. Нешпор, Е. Ю. Чижаньков, В. Т. Варченко, 2006

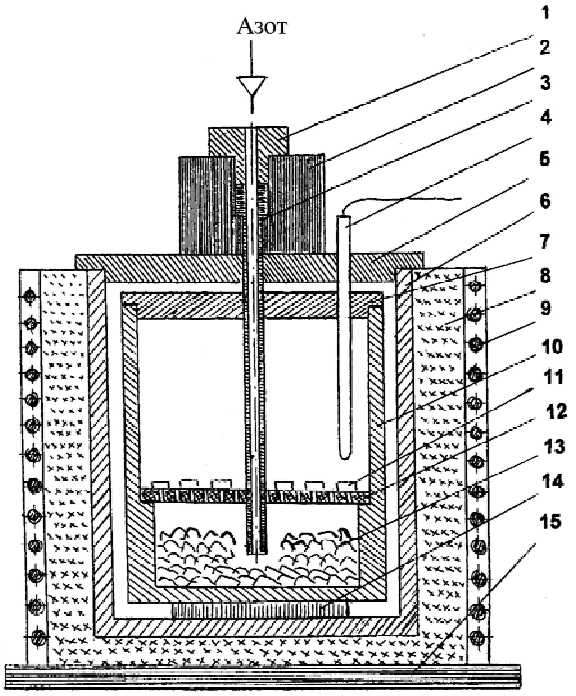


Рис. 1. Схема установки для силицирования образцов ТРГ: 1 – заглушка; 2 – свеча; 3 – газоход; 4 – термопара; 5 – крышка тигля; 6 – тигель; 7 – крышка контейнера; 8 – футеровка; 9 – индуктор; 10 – контейнер; 11 – образцы; 12 – решетка; 13 – кремний; 14 – подставка; 15 – плита

Для оценки свойств исследуемых материалов определяли прочность на изгиб $\sigma_{изг}$ при температурах 20, 800 и 1200 °С, прочность при сжатии $\sigma_{сж}$, модуль упругости при сжатии $E_{сж}$, твердость по Виккерсу HV, трещиностойкость K_{1C}, коэффициент теплового линейного расширения α и триботехнические свойства.

Прочность на изгиб $\sigma_{изг}$ и трещиностойкость K_{1C} при 20 °С определяли на образцах в виде балочек размерами 4×6×30 мм при трехточечном изгибе с расстоянием между опорами 20 мм. Испытания осуществляли в вакуумной камере, которой была оснащена испытательная установка 1246 Р-2. Измерение температуры проводили по показаниям вольфрам-рениевых термопар типа ВР5/20. Наименьшее остаточное давление в камере составляло 10^{-3} Па.

Твердость по Виккерсу измеряли на приборе типа НРО 250. Модуль упругости определяли при сжатии с помощью тензорезисторных преобразователей типа КФ-5П1 и измерительной системы типа СИИТ-3. Для определения трещиностойкости был использован метод “Single Edge V-notched Beam” (SEVNB) [5]. Значения коэффициентов интенсивности напряжений K_{1C} подсчитывали с учетом размеров поперечного сечения образца и отношения глубины надреза к высоте испытательной балочки. Коэффициент теплового линейного расширения α определяли на дилатометре Шевенара в диапазоне температур 20-1000 °С.

Исследование триботехнических свойств образцов силицированного ТРГ проводили на машине трения М-22М по методике ГОСТ 26614-85 [6] по схеме “вал-вкладыш” с определением износа образца и коэффициента трения. В качестве контртела использовали кольцо из закаленной стали 45 с твердостью HRC 50-55. Интенсивность износа пары трения оценивали линейным и массовым методами. Температуру образца при трении в зоне контакта измеряли хромель-копелевой термопарой.

Результаты исследований

Проведенные эксперименты показали, что для получения более полной и качественной пропитки кремнием необходимо обеспечить открытую пористость путем введения порообразователя. Это обеспечивается введением порообразователя – гидрокарбоната аммония.

Установлено, что силицирование образцов ТРГ с начальной плотностью 0,25-0,75 г/см^3 повысило плотность в 8-10 раз до конечной плотности 2,50-2,85 г/см^3. Увеличение плотности исходных образцов с 0,75 до 1,75 г/см^3 не влияет на конечную плотность силицированных образцов, а приводит к их расслоению. Это может быть обусловлено внутренним давлением в закрытых порах образцов ТРГ при увеличении температуры [7]. Таким образом, установлено, что для силицирования оптимальные значения плотности исходных образцов ТРГ находятся в пределах 0,5-0,75 г/см^3.

Рентгенофазовый анализ образцов показал, что силицированный ТРГ содержит карбид кремния (~90 масс.%), несвязанный кремний и частично графит. Исследования, выполненные методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии, показали, что для микроструктуры силицированного ТРГ характерна разнозернистость: основной диапазон размеров зерен карбида кремния составляет 3-20 мкм. Карбид кремния в образцах представлен кубической модификацией. В зернах карбида кремния обычно наблюдаются двойники. Несвязанный карбид кремния находится в виде монолитных включений в матрице карбида кремния. Типичная структура излома образца силицированного графита, испытанного на прочность при комнатной температуре, показана на рис. 2.

Физико-механические свойства исследованного силицированного ТРГ приведены в таблице 1. В этой же таблице для сравнения показаны свойства стандартных силицированных графитов марок СГ-Т и СГ-П [8, 9].

Повышение механических характеристик силицированного ТРГ по сравнению со стандартными материалами мы связываем главным образом с оптимально подобранной пористостью исходных графитовых заготовок. Полученный нами материал имеет прочность при сжатии на 20-70 % и прочность при изгибе на 20-30 % выше, чем у образцов силицированного графита марок СГ-Т и СГ-П. Модуль упругости при сжатии силицированного ТРГ в 5-6 раз больше, чем для графитов СГ-Т и СГ-П. Твердость по Виккерсу

Таблица 1 – Физико-механические характеристики силицированных графитов

Характеристики	Силицированный графит на основе ТРГ	СГ-Т [8, 9]	СГ-П [8, 9]
Плотность, ρ, г/см^3	2,7-2,9	2,5-2,7	2,4-2,6
Предел прочности, МПа $\sigma_{сж}$, при сжатии $\sigma_{и}$, при изгибе	 490-560 120-140	 300-320 90-110	 420-450 100-120
Модуль упругости при сжатии, $E_{сж}$, ГПа	650	95	127
Твердость	6,0-7,0 по Виккерсу, ГПа	65-78 HRA по Роквеллу	–
Трещиностойкость, K_{1C}, МПа·м$^{-1/2}$	3,6-3,7	–	–
Коэффициент теплового линейного расширения, при 20-1000 °С, α, 10^{-6} 1/К	4,27	4,60	4,20
Коэффициент трения, f	0,26 (воздух) 0,11 (вода) 0,06 (масло) (при удельном давлении Р= 0,7 МПа)	0,05 (масло)	0,16 (вода) 0,04 (масло)

находится в пределах 6,0-7,0 ГПа, что также существенно выше, чем у стандартного материала СГ-Т. Коэффициенты теплового линейного расширения для силицированного ТРГ и графитов марок СГ-Т и СГ-П практически совпадают. Было установлено, что при увеличении температуры испытаний предел прочности при изгибе силицированного ТРГ снижается постепенно и составляет при комнатной температуре 120-140 МПа, при 800 °С – 100-110 МПа, при 1200 °С – 40-50 МПа.

Триботехнические характеристики силицированного графита на основе ТРГ определяли при испытаниях на воздухе, в воде и масле И-20 (таблица 2). Удельное давление при испытаниях изменяли в пределах от 0,7 до 2,8 МПа. При постоянной скорости скольжения (V = 4 м/с) путь трения составлял 1 км. Интенсивность износа пары трения оценивали линейным и массовым методами.

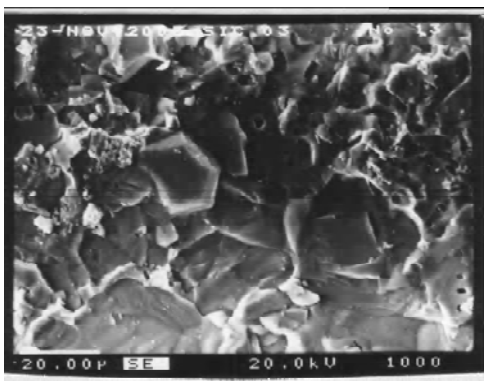


Рис. 2. Фрактограмма излома образца силицированного ТРГ, испытанного на прочность при комнатной температуре

Можно отметить, что коэффициенты трения силицированного ТРГ находятся на уровне коэффициентов трения стандартных материалов марок СГ-Т и СГ-П (см. табл. 2). В паре трения силицированный ТРГ-сталь 45 коэффициенты трения при работе в воде и масле уменьшаются по сравнению с работой на воздухе (сухое трение): в воде – в 1,5-2,0 раза; в масле И-20 – в 3-4 раза. При увеличении удельного давления с 0,7 МПа до 2,8 МПа коэффициенты трения возрастают: на воздухе – в 2 раза, в воде – в 3 раза, в масле – 2-2,5 раза.

Линейный износ при испытаниях в воде и масле существенно уменьшается по сравнению с сухим трением. Так, например, в воде он уменьшился в 1,5-1,7 раза, в масле – в 2 раза.

Можно отметить, что при работе в воде массовый износ остался на уровне сухого трения. Массовый износ при работе в масле уменьшился: при удельных давлениях 0,7 и 1,4 МПа в 5 раз, при больших удельных давлениях (2,1 и 2,8 МПа) – в 1,5-3 раза. Следует отметить тенденцию увеличения линейного износа с увеличением удельного давления в исследованном диапазоне при испытаниях во всех средах и немонотонное изменение массового износа при изменении удельного давления в условиях испытаний на воздухе и воде.

Выводы

1. Разработана и исследована лабораторная технология изготовления силицированного композиционного материала на основе ТРГ. Установлено, что для получения более полной и качественной пропитки кремнием необходимо обеспечить открытую пористость

Таблица 2 – Триботехнические свойства силицированного графита на основе ТРГ

№ п.п.	Среда испытаний	Удельное давление P, МПа	Коэфф. трения f	Линейный износ пары трения, $I_л$, мкм/км	Массовый износ образца $I_м$ мг/км	Температура композита t, °С
1	Воздух (сухое трение)	0,7 1,4 2,1 2,8	0,26 0,31 0,38 0,41	16,0 34,6 37,4 42,4	2,5 3,6 3,2 2,3	95 114 205 250
2	Вода	0,7 1,4 2,1 2,8	0,11 0,22 0,27 0,37	9,6 20,3 22,0 27,9	3,4 4,0 2,5 2,2	22 39 45 69
3	Масло И-20 (граничное трение)	0,7 1,4 2,1 2,8	0,06 0,11 0,12 0,14	8,3 15,3 19,6 22,0	0,5 0,7 0,9 1,4	36 53 66 88

Примечание. Скорость скольжения – 4,0 м/с; Путь трения – 1,0 км.

путем введения порообразователя. Оптимальные значения плотности исходных образцов ТРГ для силицирования находятся в пределах 0,5-0,75 г/см^3.

2. Исследование структуры, физико-механических и триботехнических свойств разработанного материала показало, что использование силицированного ТРГ с повышенными характеристиками может быть перспективно для деталей, работающих в напряженных узлах трения.

Список литературы

1. Костиков В.И., Варенков А.Н. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 560 с.
2. Тарабанов А.С., Костиков В.И. Силицированный графит. М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
3. Вишняков Л.Р. Ущільнюючі армовані композити на основі термічно розширеного графіту //Вопросы атомной науки и техники. – Харьков: 1999. – С. 93-99.
4. Вишняков Л.Р., Косыгин Э.П., Мороз В.П., Синайский Б.Н. и др. Исследование физико-механических свойств силицированного терморасширенного графита // Композиционные материалы в промышленности / Мат-лы XXVI Международной конференции. Ялта, 2006. – С. 383-384.
5. Гогоци Г.А. Трещиностойкость современной керамики и керамических композитов. // Порошк. металлургия, 2004. – № 7/8. – С. 54-67.
6. Полотай В.В. Машины для испытания на трение и износ // Технология и организация производства, 1970. – № 6. – С. 86-88.
7. Мацуй Л.Ю., Вовченко Л.Л., Жураков А.В. Влияние температуры на прочностные характеристики композиционных материалов на основе терморасширенного графита//Металлофиз. новейшие технол./ Metallofiz. Noveishie Tehnol. 2001, т. 23. – № 12. – С. 1677-1686.
8. Машиностроительные материалы / Справочник. Ред. А.Я.Расскатов, М.: Машиностроение, 1980. – 540 с.
9. Энциклопедия неорганических материалов / Т.2., Киев: Главн.ред. Укр. Сов.энц. (УСЭ), 1977. – 812 с.

Одержано 6.09.2006

Розглядаються питання одержання та дослідження механічних та триботехнічних властивостей силіційованого композиційного матеріалу на основі термічно розширеного графіту для деталей, які працюють у вузлах тертя.

The problems of receiving and investigation of mechanical and tribotechnical properties of silicate composite material based on thermal widen graphite for details working in friction units were shown.

УДК 531.224.4:621.78

Д-р техн. наук Д. Е. Капуткин

Государственный институт стали и сплавов (Технологический университет), г. Москва

КРИТЕРИЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ФОРМЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

Для объектов простой геометрической формы предложен безразмерный критерий, связывающий геометрические и термические параметры, при превышении которого коробление становится неизбежным даже при симметричном нагреве или охлаждении.

При нагревании или остывании различных объектов часто наблюдается их коробление – то есть неуправляемое изменение формы. Эти изменения вызваны тем, что в процессе нагревания или остывания различные участки объема вещества обладают различной температурой, вследствие чего из-за неравномерного термического расширения возникают термические напряжения. Поскольку в однородном материале чем выше температура, тем больше удельный объем, то в более нагретых зонах имеют место напряжения сжатия, а в более холодных – растяжения. Для объектов сложной формы практически не существует способа добиться симметричного распределения напряжений, однако это возможно для относительно простых по форме объектов – например, стержней или пластин. Теория термической обработки материалов требует проведения нагрева или охлаждения так, чтобы температуры на обеих поверхностях пластины или по всей окружности круглого стержня были одинаковыми. В этом случае напряжения оказываются распределенными симметрично относительно центральной плоскости пластины или оси стержня и изгибающий момент равен нулю. В этом случае неконтролируемые изменения формы (коробление или поводки) возникать не должны [1]. Если же коробление все-таки имеет место, то единственной его причиной полагается наличие вариаций температуры по пространству печи при нагреве или охлаждающей среды при охлаждении.

Представляется, что это не совсем так. Рассмотрим распределение температур внутри объекта относительно простой формы: плоской пластины толщиной D_n, шириной $B_n >> D_n$ и длиной $L_n > B_n$ или круглого стержня диаметром D_c и длиной $L_c >> D_c$ – при симметричном нагревании (рис. 1, а) или охлаждении (рис. 1, б). Если бы слои материала в объекте (плоские в пластине или цилиндрические в стержне) не были бы связаны между собой, то продольное сечение объекта приобрело бы вид, показанный на рис. 2 (термическим расширением поперек объекта пренебрегаем, так как оно равномерное). Однако связь слоев друг с другом приводит к тому, что форма продольного сечения объекта остается практически прямоугольной, но во внешних зонах нагреваемого объекта появляются напряжения сжатия, а во внутренних – напряжения растяжения. Для охлаждаемого объекта картина обратная (см. рис.2).

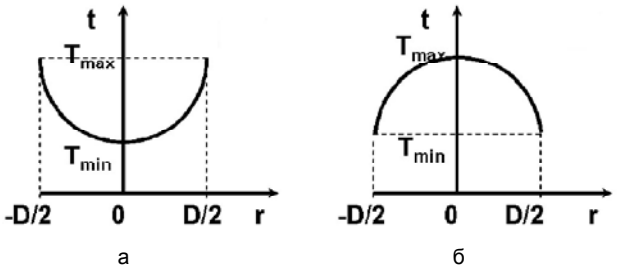


Рис. 1. Схема распределения температур *t* при нагревании (а) и охлаждении (б) в зависимости от расстояния *r* от оси стержня диаметром *D* или плоскости симметрии пластины толщиной *D*

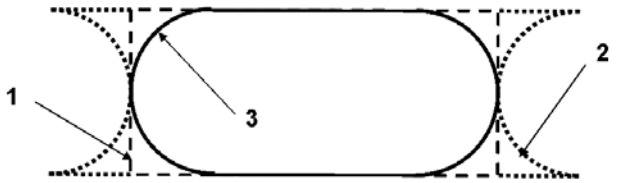


Рис. 2. Схема возможного изменения сечения объекта (1) при его нагревании (2) или охлаж-дении (3) в предположении отсутствия связи между слоями. Температура на оси сечения полагается равной исходной

Возникающие напряжения сжатия в сумме создают некоторую сжимающую силу. Как известно из теории сопротивления материалов [2], сжимающая сила даже при симметричном распределении напряжений может вызывать потерю устойчивости сжатия – то есть коробление объекта. В соответствии с [2], критическая величина силы сжатия, при превышении которой исчезает прямолинейность объекта

$$P_{сж}^{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu L)^2}, \qquad (1)$$

© Д. Е. Капуткин, 2006

где E – модуль Юнга материала, J – момент инерции сечения объекта, L – длина объекта, – коэффициент приведения длины, при свободных концах объекта или закреплении объекта в одной точке $\mu = 2$, для закрепленных концов $\mu = 1$, а при наличии еще и k мест закрепления вдоль длины объекта $\mu = 1/(k+1)$.

Для плоской пластины $J_n = \frac{BD_n^3}{12}$, а для стержня круглого сечения $J_c = \frac{\pi D_c^4}{64}$.

В любой точке объекта величину напряжений, возникающих при нагреве (охлаждении) можно определить из соотношения [3] $\varepsilon_0 = \sigma/E + \alpha t$:

$$\sigma = E(\varepsilon_0 - \alpha t), \qquad (2)$$

где t – разность температур между данной точкой и минимальной температурой в объекте; α – линейный коэффициент термического расширения, ε_0 – среднее удлинение объекта

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{S}\int_S \alpha t dS. \qquad (3)$$

В материалах без полиморфных превращений или в таких, где объемный эффект полиморфного превращения очень мал (например, Ti и его сплавы) коэффициент α можно считать не зависящим от температуры. Тогда для пластины

$$\varepsilon_{0n} = \frac{2\alpha}{D_n}\int_0^{D_n/2} t dr, \qquad (4)$$

где r – расстояние от плоскости симметрии пластины до данной точки.

Для стержня

$$\varepsilon_{0c} = \frac{8\alpha}{D_c^2}\int_0^{D_c/2} t r dr, \qquad (5)$$

где r – расстояние от оси стержня до данной точки.

Распределение температур внутри объекта зависит от времени и от условий подвода тепла при нагревании или его отвода при охлаждении. Однако в некотором приближении его можно представить в виде

$$t = (T_{\max} - T_{\min})\left(\frac{2r}{D}\right)^n, \qquad (6)$$

где $T_{\max}$ и $T_{\min}$ – соответственно максимальная и минимальная температура внутри объекта. Относительное удлинение в любой точке

$$\varepsilon(r) = \alpha(T_{\max} - T_{\min})\left(\frac{2r}{D}\right)^n. \qquad (7)$$

В этом случае из (3) и (7) для пластины

$$\varepsilon_{0n} = \frac{\alpha(T_{\max} - T_{\min})}{n+1}, \qquad (8)$$

а из (4) и (7) для стержня круглого сечения

$$\varepsilon_{0c} = \frac{2\alpha(T_{\max} - T_{\min})}{n+2}. \qquad (9)$$

Поскольку вплоть до потери устойчивости напряжения в объекте уравновешены, то общую сжимающую силу можно определить как

$$P_{сж} = \varepsilon_0 E S_0 - \int_{S_0} \sigma dS, \qquad (10)$$

где S_0 – площадь той зоны, где действуют напряжения сжатия (или растяжения) – то есть той зоны, где $\varepsilon(r)$ больше (или меньше) ε_0. Из (3) для пластины граница этой зоны

$$r_{0n} = \frac{D_n}{2\cdot(n+1)^{1/n}}. \qquad (11)$$

Из (4) для стержня:

$$r_{0c} = \frac{D_c \cdot 2^{1/n}}{2\cdot(n+2)^{1/n}}. \qquad (12)$$

Отсюда из (3), (7), (10), (11) величина сжимающей силы для пластины:

$$P_{сж.п} = 2EB_n(\varepsilon_{0n} r_{0n} - \int_0^{r_{0n}} \varepsilon dr) =$$

$$= EB_n D_n \alpha(T_{\max} - T_{\min})\frac{n}{(n+1)^{2+1/n}}. \qquad (13)$$

а из (4), (7), (10), (12) для стержня:

$$P_{сж.с} = \pi E(\varepsilon_{0c} r_{0c}^2 - 2\int_0^{r_{0c}} \varepsilon r dr) =$$

$$= 0{,}5\pi E D_{0c}^2 \alpha(T_{\max} - T_{\min})\frac{2^{2/n} n}{(n+2)^{2+2/n}}. \qquad (14)$$

Учитывая, что

$A_n(n) = \frac{n}{(n+1)^{2+1/n}}$ имеет максимум, равный 0,1303,

при n = 1,5, а

$A_c(n) = \frac{2^{2/n} n}{(n+2)^{2+2/n}}$ имеет максимум, равный 0,06515

при n = 3,1,

из (1), (13), (14) получаем критерий, при превышении которого $P_{сж}$ превосходит $P_{сж}^{кр}$

$$K_p = \sqrt{\alpha(T_{\max} - T_{\min})} \cdot \mu \cdot \frac{L}{D}. \qquad (15)$$

Можно заметить, что величина $\delta = \alpha(T_{\max} - T_{\min})$ есть разница относительных удлинений при $T_{\max}$ и $T_{\min}$ или относительный дилатометрический эффект от нагрева (охлаждения) материала в интервале температур ($T_{\min}$ - $T_{\max}$). Отсюда критерий

$$K_p = \sqrt{\delta} \cdot \mu \cdot \frac{L}{D}. \qquad (16)$$

В такой форме этот критерий подходит и для материалов с сильной зависимостью а от температуры, что обычно имеет место при протекании полиморфных или иных фазовых превращений в материале.

Критическая величина критерия K_p для пластины $K_{pп} = 5{,}1$, а для стержня круглого сечения $K_{pс} = 4{,}4$.

Если указанный критерий K_p для данного вида обработки выше критического, то даже при полностью симметричном поддержании температуры материала коробление объекта будет возможным.

Но возможность коробления не означает, что объект неизбежно изменит форму. Во-первых, распределение температур в нем может отличаться от рассмотренного, то есть величина $A(n)$ будет иной. Функция $A(n)$ убывает с ростом n не очень быстро и при n = 10 A_n = 0,0512, A_c = 0 ,0485, а при n = 20 A_n = 0,334, A_c = 0,325. Столь высокие показатели степени могут иметь место в начале процесса нагрева (охлаждения), то есть как раз тогда, когда разность температур в центре и на поверхности максимальна. В этом случае для того, чтобы появилось коробление пластины, критическая величина возрастает до 8-10, а для стержня – до 5-6,5. Отсюда можно считать, что когда $K_{pп}$ становится больше 10, а $K_{pс}$ – 6,5, то коробление объекта в процессе термической обработки становится неизбежным.

Для экспериментальной проверки полученных результатов было исследовано коробление стержней из стали 40 длиной 35-130 мм и диаметром 2 мм. Образцы были медленно нагреты до 900 К, после чего быстро охлаждены в вертикальном положении вертикальным потоком воздуха комнатной температуры. Замеряли прогиб в центре стержня после охлаждения до комнатной температуры с точностью 0,05 мм. До нагрева погиб не превышал 0,05 мм. Считая, что максимальная разность температур на поверхности и центре стержня достигала 500 К, получили, что когда K_p меньше критического для возможного коробления, то значимого искривления стержня не выявляется, а при превышении расчетного значения искривление стержня становится значимым (рис. 3).

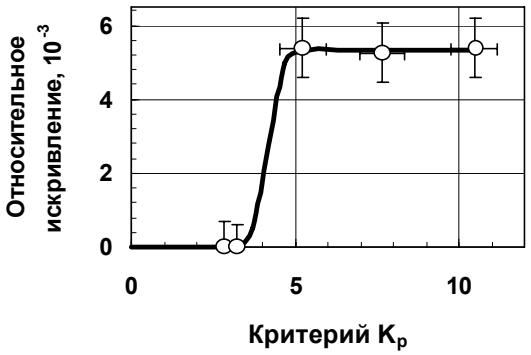


Рис. 3. Зависимость относительного искривления (отношения прогиба к длине) стержня от величины $K_p = \sqrt{\delta} \cdot \mu \cdot \frac{L}{D}$

Список литературы

1. Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева. Материаловедение. // М.: Машиностроение. – 1990. – 528 с.
2. В.И.Феодосьев. Сопротивление материалов. // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2000. – 592 с.
3. М.Л.Бернштейн, В.А.Займовский. Механические свойства металлов. // М.: Металлургия. – 1979. – 490 с.

Одержано 19.10.2006

Для об'єктів простої геометричної форми запропоновано безрозмірний критерій, який пов'язує геометричні й термічні параметри, при перевищенні якого короблення стає неминучим навіть при симетричному нагріванні чи охолодженні.

The stretch criterion was proposed for simple geometrical form objects. This criterion connects geometrical and thermal parameters and with it's exceeding the distortion becomes unavoidable even during symmetrical heating and cooling.

УДК 669.248:621.745.4

Н. А. Лысенко[1], В. В. Клочихин[1], канд. техн. наук А. В. Богуслаев[1],
д-р техн. наук Э. И. Цивирко[2]

[1] ОАО "Мотор Сич", [2] Национальный технический университет,
г. Запорожье

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ШИХТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ ВОЗВРАТНЫХ ОТХОДОВ СПЛАВА ЖС3ЛС-ВИ

Переплав возвратных литейных отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС3ЛС-ВИ на вакуумной установке FM 1-2-100 "ULVAC" позволяет получить шихтовую заготовку с высокими качественными показателями, не уступающими шихтовой заготовке, полученной сплавлением свежих компонентов в открытой индукционной печи. Использование возвратных литейных отходов имеет высокую экономическую эффективность.

Введение

Эксплуатационные надежность и долговечность литых рабочих и сопловых лопаток турбин ГТД в значительной степени зависят от качества применяемых для их изготовления дорогостоящих никелевых жаропрочных сплавов [1, 2]. В связи с отсутствием месторождений никеля в Украине, а также высоким содержанием в таких сплавах дефицитных легирующих элементов (кобальт, вольфрам, молибден, ниобий и др.) становится актуальным повторное использование возвратных литейных отходов для производства качественного авиационного литья [3, 4].

В настоящей работе изучали влияние особенностей получения шихтовой заготовки сплава ЖС3ЛС на его качественные показатели.

Методика проведения исследований

Шихтовую заготовку сплава ЖС3ЛС выплавляли в открытой и вакуумной индукционных печах.

В 500 кг открытой индукционной печи с основной футеровкой сплав ЖС3ЛС получали методом сплавления свежих компонентов и разливали его при температуре 1550-1580 °С в металлические изложницы для получения литых заготовок диаметром 105 мм, с которых затем механообработкой снимали поверхностный слой до ∅ 90 мм.

В вакуумной установке FM 1-2-100 фирмы "ULVAC" в 100 кг индукционной печи с магнезитовой футеровкой переплавляли возвратные литейные отходы сплава ЖС3ЛС-ВИ, прошедшие предварительную очистку от окислов и остатков керамики литейной формы. При достижении в рабочей камере установки остаточного давления 0,665 Па начинали расплавление шихты и нагревали расплав до температуры 1600±20 °С, который затем заливали через фильтр из диоксида циркония в нагретые до 300 °С металлические изложницы для получения литой заготовки ∅ 105 мм и весом 30-35 кг. Предварительно в собранные изложницы были поставлены донышки из сплава ЖС3ЛС-ВИ толщиной 10 мм.

Из полученных литых заготовок сплавов ЖС3ЛС (1 вариант) и ЖС3ЛС-ВИ (2 вариант) были изготовлены образцы для определения химического состава, изучения макро- и микроструктуры, механических свойств и длительной прочности.

Макроструктуру сплавов изучали на поперечных темплетах ∅ 90-105 мм после химического травления в реактиве, состоящем из 80 % HCl и 20 % H_2O_2, при комнатной температуре в течение 15…20 мин.

Микроструктуру оценивали на нетравленых и после травления в реактиве Марбле (40г $CuSO_4$, 200 $см^3$ HCl, 200 $см^3$ H_2O) микрошлифах (микроскоп "NEOPHOT-32", увеличение до $500^{\times}$).

Образцы для механических и жаропрочных испытаний проходили термическую обработку: нагрев до температуры 1190^{-30} °С, выдержка при этой температуре 4 часа и охлаждение на воздухе. Длительная прочность определялась при температуре 950 °С и напряжении в рабочей зоне образцов 120 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав исследуемых сплавов соответствует требованиям ОСТ1.90.127-91 (табл. 1). При этом следует отметить, что в сплаве ЖС3ЛС, полученном из свежих компонентов, было выше содержание углерода, вольфрама, молибдена, алюминия и титана. В то же время он был чище по таким примесям, как сера и фосфор (табл.1).

Визуальное изучение поверхности заготовок сплавов показало, что на поверхности заготовки сплава ЖС3ЛС, прошедшей предварительную мехобработку на глубину 7,5 мм, наблюдались неслитины, чистые раковины в допустимых ОСТ 1.90.127-85 пределах. На поверхности заготовки сплава ЖС3ЛС-ВИ неслитин, плен и других дефектов в виде загрязнений металла не обнаружено.

© Н. А. Лысенко, В. В. Клочихин, А. В. Богуслаев, Э. И. Цивирко, 2006

Таблица 1 – Химический состав заготовок из сплавов ЖС3ЛС и ЖС3ЛС-ВИ

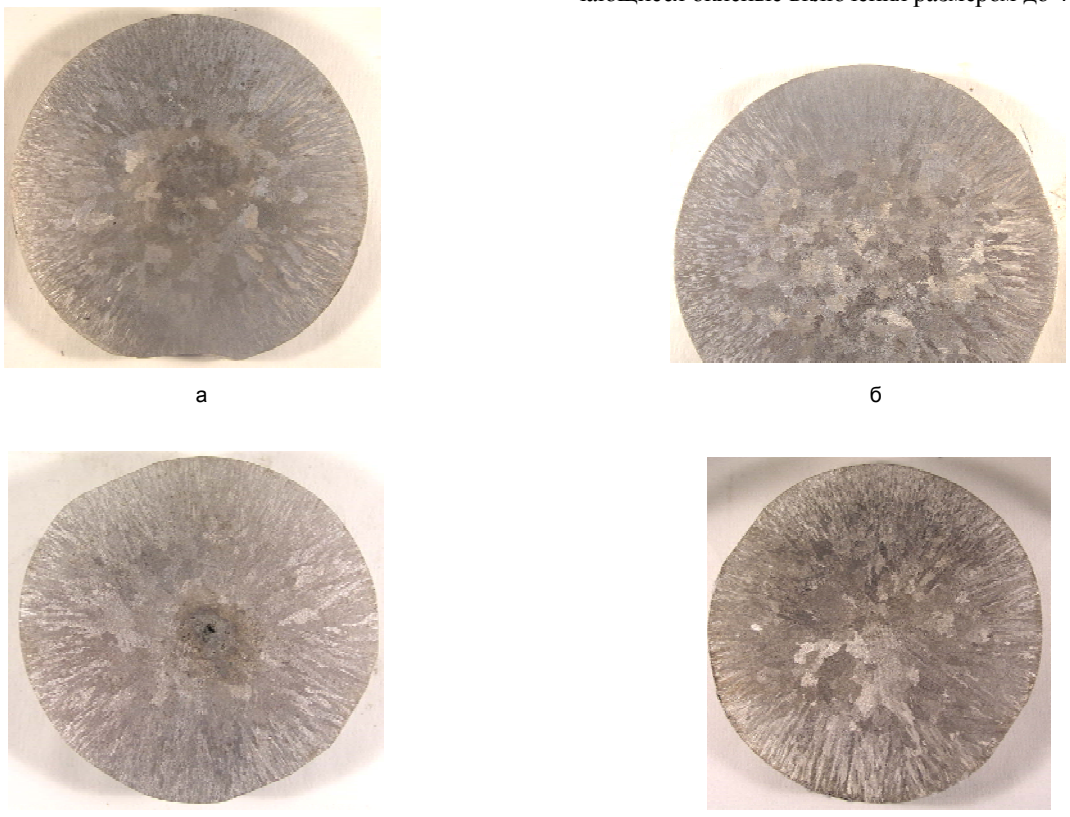
Марка сплава	Массовая доля элементов, %											
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Si	Mn	S	P
ЖС3ЛС-ВИ	0,07	16,96	4,64	3,92	2,57	2,66	3,70	0,5	<0,6	<0,6	0,004	0,004
ЖС3ЛС	0,11	16,69	4,44	4,06	2,68	2,73	4,01	0,16	<0,6	<0,6	0,002	0,002
Нормы ОСТ1. 90.127-85	0,06-0,12	15,0-18,0	4,0-5,0	3,0-4,5	2,4-3,0	2,4-3,0	3,0-4,5	≤2,0	≤0,6	≤0,6	≤0,015	≤0,015

Таблица 2 – Параметры макроструктуры шихтовых заготовок сплавов ЖС3ЛС-ВИ и ЖС3ЛС

Марка сплава	Размер криталлизационных зон, мм			Центральн. пористость мм	Величина макрозерна, мм
	мелких подкорковых кристаллов	столбчатых кристаллов	равноосных кристаллов		
ЖС3ЛС-ВИ	2…3	19…21	63…67	до Ш 30	3…8
ЖС3ЛС	1,5…2,5	18…22	46…54	до Ш 22	2…6

В макроструктуре шихтовых заготовок обоих сплавах как в нижней, так и в средней части отливок (рис. 1) наблюдались мелкие подкорковые, столбчастые и равноосные кристаллы. В центральной зоне макротемплетов выявлена осевая усадочная рыхлота. Количественная оценка макроструктурных параметров (табл. 2) показала, что условия кристаллизации шихтовых заготовок обоих сплавов были примерно одинаковыми.

При металлографическом исследовании в верхней части заготовки сплава ЖС3ЛС-ВИ обнаружены грубые загрязнения металла в виде плен и шлаковых включений (рис. 2). Глубина их залегания не превышала ~ 2 мм от верха заготовки. На боковой поверхности исследуемой заготовки пленочные и шлаковые загрязнения металла практически отсутствовали. В средней и нижней зонах выявлены единичные редко встречающиеся окисные включения размером до 40 мкм.



а б в г

Рис. 1. Макроструктура в поперечном сечении средней (а, в) и нижней (б, г) части шихтовых заготовок из сплавов ЖС3ЛС-ВИ (а, б) и ЖС3ЛС (в, г)

а б

Рис. 2. Загрязнения в верхней части литых заготовок из сплавов ЖС3ЛС-ВИ (а) и ЖС3ЛС (б), ×100

В верхней части заготовки из сплава ЖС3ЛС открытой выплавки обнаружены плены, сопровождающиеся скоплением карбонитридных включений типа Ti(C,N) (рис. 3, а), а также единичные шлаковые включения (рис. 3, б). Размер карбонитридов составлял 8…18 мкм, шлаковых включений – до 270 мкм. Плены располагались по всему объему заготовки с преимущественным выделением вблизи поверхности. Максимальное количество карбонитридных скоплений, крупных частиц шлаковых включений и плен сосредоточено в поверхностной зоне литой заготовки (на расстоянии до 12 мм от верха заготовки). В средней части заготовки из сплава ЖС3ЛС количество плен и неметаллических включений значительно меньше, чем в верхней части. В осевом сечении имеется усадочная рыхлота с наличием отдельных включений карбонитридов.

При этом следует отметить, что грубые шлаковые включения и скопления карбонитридов, характерные для сплава ЖС3ЛС, в сплаве ЖС3ЛС-ВИ не обнаружены.

Микроструктура исследуемых заготовок после травления представляла собой γ-твердый раствор с наличием интерметаллидной γ′-фазы, карбидов и карбонитридов, что характерно для состояния сплава ЖС3ЛС. Микроструктура образцов до и после термообработки по стандартному режиму сплава удовлетворительная (рис. 4, а). В микроструктуре образцов из заготовки сплава ЖС3ЛС выявлены скопления карбонитридов (рис. 4, б).

Механические и жаропрочные свойства термообработанных образцов, отлитых методом равноосной кристаллизации из материала прутковых заготовок (сплав ЖС3ЛС-ВИ), полученных из возвратных отходов, а также из серийных заготовок (сплав ЖС3ЛС) соответствовали требованиям ОСТ1.90.127-85 и находятся примерно на одном уровне (табл. 3).

а б

Рис. 3. Микроструктура термообработанных образцов сплавов ЖС3ЛС-ВИ (а), ЖС3ЛС (б), ×200

Таблица 3 – Механические и жаропрочные свойства шихтовой заготовки сплавов ЖС3ЛС-ВИ и ЖС3ЛС

Материал сплава	Механические свойства при t = 20 °С			Длительная прочность (при $T_{исп.}$ =950 °С, и σ = 120 МПа), τ_p, час
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	
ЖС3ЛС-ВИ	791,0…850,0*) / 820,5	8,0…11,6 / 9,8	9,3…16,4 / 12,9	124,5 …183,0 / 146,0
ЖС3ЛС	874,0…934,0 / 907,0	9,2…14,4 / 12,1	7,9…14,6 / 11,6	137…174 / 141,25
Нормы ОСТ1.90.127-85	–	–	–	≥ 100,0

**) Числитель – минимальные и максимальные значения; знаменатель – средние значения.*

Для схеми штамповки I і II легко визначити

$$V_I^* = \frac{R\sqrt{K_{вит}-2}}{HK_{вит}}, \quad (7)$$

$$V_{II}^* = \frac{2R\sqrt{K_{вит}-2}}{HK_{вит}}. \quad (8)$$

Значення V^* для схеми III визначається за формулою

$$V_{III}^* = \frac{3}{K_{вит}} + \frac{8H^2}{3R^2K_{вит}^3}. \quad (9)$$

При визначенні деформованого об'єму $V_{о.д.}$ для схеми IV-VIII враховували можливість перекриття локальних зон деформації (рис. 4).

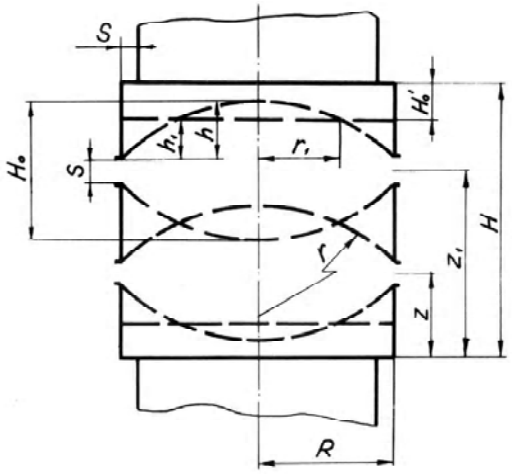


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення деформованого об'єму металу

Для схеми IV маємо:

при $H_0 + H_0' \le H$,

$$V_{IV}^* = \frac{R\sqrt{K_{вит}-2}}{K_{вит}\cdot H} + \frac{3}{K_{вит}} + \frac{8H^2}{3R^2K_{вит}^3}, \quad (10)$$

а якщо $H_0 + H_0' \ge H$, то

$$V_{о.д.IV} = \frac{1}{3}\pi h_1\left(3R^2 + 3r_1^2 + h_1^2\right) + \frac{\pi R^2\left(H + R\sqrt{K_{вит}-2}\right)}{K_{вит}}, \quad (11)$$

де $h_1 = \frac{H(K_{вит}-1) - R\sqrt{K_{вит}-2}}{2K_{вит}}$,

$$r_1^2 = R^2 - h_1^2 - 2h_1\frac{R^2K_{вит}^2 - 4H^2}{4HK_{вит}}.$$

Розташування компенсаційної щілини при умові створення максимального деформованого об'єму визначається розміром

$$z = \frac{HK_{вит} - R\sqrt{K_{вит}-2}}{2K_{вит}}.$$

Деформований об'єм для схеми V визначається як

$$V_{о.д.V} = \frac{2}{3}\pi h_1\left(3R^2 + 3r_1^2 + h_1^2\right) + \frac{\pi R^2 H}{K_{вит}}, \quad (12)$$

де $h_1 = \frac{H(K_{вит}-2)}{4K_{вит}}$; розташування щілин $z = \frac{H}{4}$; $z_1 = \frac{3H}{4}$.

Для схеми VI маємо:

при $H_0 + 2H_0' \le H$,

$$V_{VI}^* = \frac{2R\sqrt{K_{вит}-2}}{HK_{вит}} + \frac{3}{K_{вит}} + \frac{8H^2}{3R^2K_{вит}^3}; \quad (13)$$

$$z = \frac{H}{2},$$

а якщо $H_0 + 2H_0' \ge H$, то

$$V_{о.д.VI} = \frac{1}{3}\pi h_1\left(3R^2 + 3r_1^2 + h_1^2\right) + \frac{\pi R^2\left(H + 2R\sqrt{RK_{вит}-2}\right)}{K_{вит}}, \quad (14)$$

де $h_1 = \frac{H(K_{вит}-1) - 2R\sqrt{K_{вит}-2}}{2K_{вит}}$; $z = \frac{H}{2}$.

Для схеми VII

$$V_{о.д.VII} = \frac{2}{3}\pi h_1\left(3R^2 + 3r_1^2 + h_1^2\right) + \frac{\pi R^2\left(2H + R\sqrt{K_{вит}-2}\right)}{K_{вит}}, \quad (15)$$

де $h_1 = \frac{H(K_{вит}-2) - R\sqrt{K_{вит}-2}}{4K_{вит}}$;

$$z = \frac{HK_{вит} - R\sqrt{K_{вит}-2}}{4K_{вит}};$$

$$z_1 = \frac{3HK_{вит} - 3R\sqrt{K_{вит}-2}}{4K_{вит}}.$$

Для схеми VIII:

при $2H + 2H_0' \le H$,

$$V^* = \frac{2R\sqrt{K_{вит}-2}}{HK_{вит}} + \frac{6}{K_{вит}} + \frac{16H^2}{3R^2K_{вит}^3}, \qquad (16)$$

а, якщо $2H + 2H_0' \geq H$, то

$$V_{о.д.VIII} = \frac{2}{3}\pi h_1\left(3R^2 + 3r_1^2 + h_1^2\right) + \frac{2\pi R^2\left(H + R\sqrt{K_{вит}-2}\right)}{K_{вит}}, \qquad (17)$$

де $h_1 = \frac{H(K_{вит}-2) - 2R\sqrt{K_{вит}-2}}{4K_{вит}}$;

$$z = \frac{HK_{вит} + 2R\sqrt{K_{вит}-2}}{4K_{вит}};$$

$$z_1 = \frac{3HK_{вит} - 2R\sqrt{K_{вит}-2}}{4K_{вит}}.$$

Значення відносного деформованого об'єму металу V^* для різних схем штампування наведено на рис. 5.

Формули (7...17) відносяться до використання компенсаційних щілин, розташованих уздовж усього периметра порожнини матриці (рис. 6, а), для створення локальної зони деформації в об'ємі металу до початку усталеного його витікання в компенсатори.

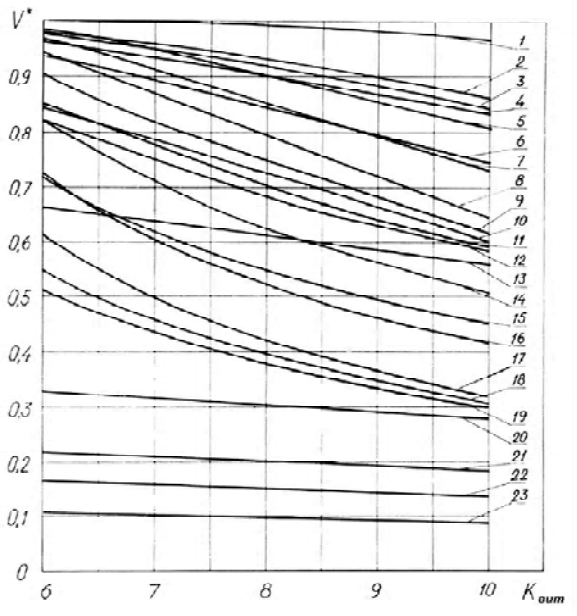


Рис. 5. Залежності відносного об'єму локальної зони деформації від коефіцієнту витікання при різних схемах штампування (див. рис. 3):
I – 20, 22, 23; II – 13, 20, 21; III – 17, 18, 19; IV – 12, 15, 16; VI – 2, 11, 14; VII – 4, 6, 7; VIII – 1, 3, 5;

$\frac{H}{D}$ = 0,5 – 1, 2, 4, 10, 12, 13, 19, 20; $\frac{H}{D}$ = 1,0 – 3, 6, 9, 11, 15, 18,Ю 20, 22; $\frac{H}{D}$ = 1,5 – 5, 7, 8, 14, 16, 17, 21, 23;

H, D – висота та діаметр заготовки

Для зменшення втрат металу досліджено застосування компенсаційних щілин, які не охоплюють усього периметру порожнини матриці (рис. 6, б-е). У даному випадку для отримання безпористого металу в об'ємі виробу круглого у плані, ширина компенсаційної щілини повинна забезпечити локальну зону деформації в плані H_0'' за величиною рівною або близькою діаметру виробів D, $H_0'' = D$. Встановлено, що величина H_0'' залежить від ширини компенсаційної щілини K і коефіцієнту витікання та з задовільною точністю описується залежністю

$$H_0'' = D = K + \frac{aH}{K_{вит}}. \qquad (18)$$

Звідки, при наявності двох діаметрально протилежно розташованих щілин (див. рис. 6, б), знаходимо

$$K = D - \frac{aH}{K_{вит}}, \qquad (19)$$

де a – параметр, залежність якого від $K_{вит}$ представлена на рис. 7. При використанні матриць з більшою кількістю компенсаційних щілин їх ширина визначається за формулою:

$$K = (0{,}75 - 0{,}85)\left(D - \frac{aH}{K_{вит}}\right), \qquad (20)$$

де більше значення перед виразом у дужках відноситься до матриць з трьома щілинами (див. рис. 6, в), менше – з чотирма (див. рис. 6, г).

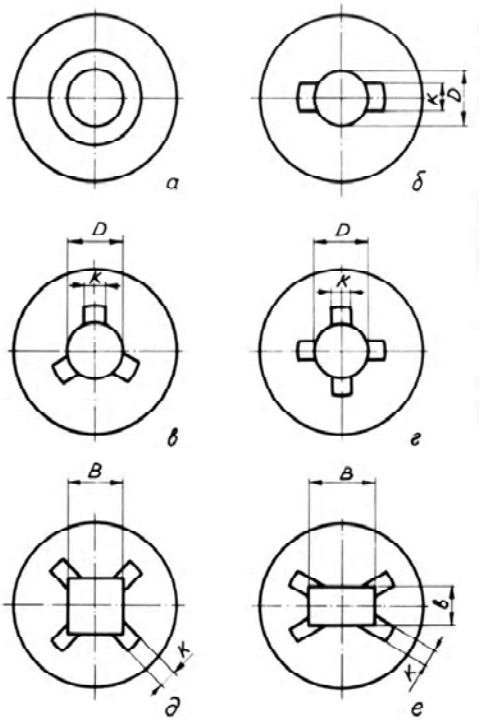


Рис. 6. Схеми розташування компенсаційних щілин при штампуванні з елементами витікання: а – уздовж усього периметру порожнини матриці; б-е – зі щілинами, які охоплюють частину периметру

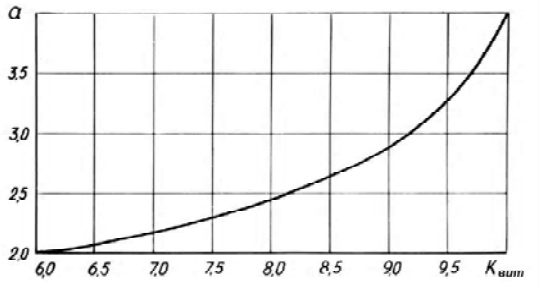


Рис. 7. Залежність параметру a від $K_{вит}$

При отриманні виробів, які мають у плані форму квадрата, прямокутника або близьку до них (див. рис. 6, г; е), ширина компенсаційної щілини визначається за формулами:

$$K = 0{,}75\left(B - \frac{aH}{K_{вит}}\right), \qquad (21)$$

$$K = 0{,}75\left(\frac{B+b}{2} - \frac{aH}{K_{вит}}\right). \qquad (22)$$

Для розрахунку розмірів компенсаційних щілин при отриманні виробів складної форми (наприклад, типу шатуна), останні необхідно розподілити на елементарні об'єми та використати наведені рекомендації.

Встановлено, що необхідний додатковий надлишок металу, який забезпечує отримання заданої інтенсивності деформацій, рівномірної структури безпористого металу при різних схемах штампування з елементами витікання не перевищує 4 % від об'єму виробу. Отже запропоновані схеми створення додаткових локальних зон деформації в зонах ускладненої деформації, де сконцентрована залишкова пористість, дозволяють збільшити деформований об'єм та щільність заготовок, керувати ущільненнями та отримувати практично безпористий метал в об'ємі виробу.

Список літератури

1. Чиченев Н.А., Кудрин А.Б., Полухин П.И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1977. – 312 с.
2. Павлов В.А., Носенко М.И. Исследование горячей деформации и уплотнения порошковых металлов. // Порошковая металлургия. – 1988. – №1. – С. 1-6.
3. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 375 с.
4. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
5. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.

Одержано 27.06.2006

Приведены результаты исследований уплотнения порошковых заготовок при горячей штамповке с элементами истечения металла в компенсационные щели.

The investigation results of half-finished product powder consolidation during hot stamping with metal flowing elements in compensation chink was shown.

УДК 621.74: 658.2

Д-р техн. наук С. Г. Пелых[1], д-р техн. наук О. И. Пономаренко[2]

[1] Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск,
[2] Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков

ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

Разработана и реализована методика получения железоуглеродистых литейных сплавов с заданными физико-механическими характеристиками при минимальной стоимости шихты для их приготовления.

Постановка проблемы в общем виде

Шихтовые материалы и технология плавки в значительной степени определяют качество жидкого металла, а в конечном итоге – и качество отливки. Значительная часть литейных дефектов отливок возникает из-за несоответствия свойств жидкого металла установленным требованиям. Основными из них являются усадочные и газовые раковины, несоответствие структурно-механических свойств заданным, склонность к образованию отбела, горячие и холодные трещины.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время задача разработки сплавов с заданными физико-механическими и технологическими характеристиками решается на основе физико-механических представлений о механизме их формирования. При этом используются обобщенные двойные диаграммы состояния, данные о механизме и пределах растворимости элементов легирующего комплекса в основном металле, особенности межфазового взаимодействия при формировании элементов структу-

© С. Г. Пелых, О. И. Пономаренко, 2006

ры, использование различных методов воздействия на процесс формирования макро- и микроструктуры литейного сплава [1-4]. В последние годы на вооружении специалистов по литейному производству появились мощные современные средства и системы компьютерного моделирования, их использование может значительно повысить эффективность решения задачи разработки литейных сплавов с заранее заданными свойствами [5-7].

Выделение нерешенных частей данной проблемы

На данный момент в области решения задачи синтеза литейных сплавов хорошо разработаны физико-химические основы выбора легирующего комплекса для литейных сплавов на различной основе. Решены отдельные задачи по оптимизации их свойств, однако до настоящего времени отсутствует общий метод и алгоритм решения задачи синтеза литейных сплавов с заранее заданными свойствами про условии их минимальной стоимости.

Формулирование целей статьи

Разработать и реализовать методику и алгоритм решения задачи синтеза литейных сплавов с заданными механическими характеристиками и технологическими свойствами при минимальной стоимости шихты для их выплавки.

Изложение основного материала

Для решения задачи оптимального синтеза литейного сплава на основе выбора состава шихты и технологических параметров плавки жидкого металла необходимо:

- определить требования к химическому составу жидкого металла и компонентному составу шихты;
- рассчитать состав шихты, обеспечивающий получение отливок с заданными свойствами;
- выбрать рациональный режим плавки и разливки.

Решение первой задачи производится на основе обработки и обобщения данных производственного опыта, для решения второй используются расчетные методы, третья реализуется на основе использования приемов, отработанных в данных условиях производства. При выборе шихты необходимо регламентировать не только химический состав жидкого металла расплава, но и компонентный состав шихты.

Современным методом выбора шихты является ее расчет на основе использования методов оптимизации и аппарата математического программирования. При этом ставится задача получить минимальную по стоимости шихту, обеспечивающую заданный химический состав жидкого металла. Простым и эффективным методом компьютерного решения этой задачи является линейное программирование, хорошо освоенное в технике и экономике.

При решении задачи управления качеством отливок уже на стадии подготовки шихты и плавки жидкого металла необходимо определить зависимости между параметрами качества отливок, с одной стороны, компонентным составом шихты и химическим составом жидкого металла, с другой. Эти условия можно использовать при математической постановке данной задачи в ограничениях или в критерии оптимизации. Зависимости этого типа обычно получают методом обработки данных планируемого эксперимента, они имеют чаще всего нелинейный вид из-за наличия в них членов в виде парных взаимодействий или составляющих второго и более высокого порядка.

Наличие нелинейных составляющих в этих зависимостях делает необходимым использование нелинейного математического программирования для решения задачи управления качеством отливки на стадии расчета шихты. Существующий опыт решения оптимизационных задач показывает, что использование нелинейных моделей позволяет более точно сформулировать решаемую задачу, однако при этом значительно усложняется математическая процедура поиска оптимального решения и уменьшается надежность и точность получаемого решения. Последнее связано с тем, что существующие методы нелинейной оптимизации гарантируют определение только локального оптимума, в то время как искомое решение может представлять собой глобальный оптимум.

Для решения задачи синтеза литейного сплава с заданным уровнем механических и эксплуатационных свойств необходимо соединить точную постановку задачи управления качеством отливок на стадии расчета шихты при использовании нелинейных моделей с простой и эффективной линейной процедурой поиска оптимума. Для решения этой задачи разработан и реализован на ЭВМ следующий алгоритм.

1. На основании экспертных оценок ситуации определяется набор технологических параметров сплава (T_j) и его механических свойств (P_j), имеющих существенное значение для формирования качества отливок в изучаемых условиях.

2. По результатам обработки данных лабораторных или промышленных экспериментов определяются зависимости изучаемых свойств сплава от параметров технологии:

$$P_s = f_s(X_1, X_2, X_3), \quad (1)$$

$$T_k = f_k(X_1, X_2, X_3), \quad (2)$$

где X_1, X_2 – параметры, описывающие, соответственно, компонентный и химический состав шихты;

X_3 – фактор варианта технологического процесса приготовления жидкого металла;

f_s, f_k – функциональные зависимости.

3. Определяется исходная информация, содержащая вид компонентов шихты, их химический состав, стоимость, а также величины угара или пригара различных химических элементов при плавке.

4. Формулируется целевая функция и ограничения

решаемой задачи. В качестве критерия оптимизации в решаемой задаче принята наименьшая стоимость шихтовых материалов:

$$F(x)=\sum_{i=1}^{n} c_i x_i \Rightarrow \min , \qquad (3)$$

где c_i – стоимость i-го компонента шихты;

x_i – относительная доля i-го компонента в шихте;

n – количество шихтовых материалов.

При решении задачи вводятся ограничения на химический состав жидкого металла, компонентный состав шихты и требуемые пределы технологических и механических свойств выплавляемого металла, имеющие следующий вид:

$$Э_{jн} < Э_j < Э_{jв}, \qquad (4)$$

$$X_{iн} < X_i < X_{iв}, \qquad (5)$$

$$P_{sн} < P_s < P_{sв}, \qquad (6)$$

$$T_{kн} < T_k < T_{kв}, \qquad (7)$$

где $Э_{jн}$, $X_{iн}$, $P_{sн}$, $T_{kн}$ – нижние допустимые пределы, соответственно, j-го химического элемента, i-го компонента шихты, s-го механического свойства литого сплава, k-го технологического свойства сплава;

$Э_{jв}$, $X_{iв}$, $P_{sв}$, $T_{kв}$ – верхние допустимые пределы тех же величин.

Приведенные ограничения и величины их пределов формируются технологом исходя из необходимости обеспечения заданного уровня качества отливки. Подставив (1) и (2) в (6) и (7), получим:

$$P_{sн} < f_s (X_1, X_2, X_3) < P_{sв}, \qquad (8)$$

$$T_{kн} < f_k (X_1, X_2, X_3) < T_{kв}. \qquad (9)$$

В итоге сформулирована нелинейная оптимизационная задача с целевой функцией (3) и ограничениями (4), (5), (8), (9).

5. Методом подбора определяется нулевое приближение к решению задачи. В качестве нулевого можно использовать любое решение, удовлетворяющее ограничениям на химический состав жидкого металла и компонентный состав шихты.

6. Нелинейные ограничения (8), (9) разложением в ряд Тейлора линеаризуются в окрестностях нулевого приближения.

7. Линеаризованная задача решается на ЭВМ по критерию минимума стоимости шихты методом линейного программирования, в результате этого находим первое приближение к искомому результату.

8. На основе полученного решения определяются новые значения коэффициентов линеаризованных уравнений нелинейных ограничений.

9. Полученные значения коэффициентов используются для корректировки данных, вводимых в ЭВМ для решения задачи методом линейного программирования.

10. Решается новая линейная оптимизационная задача, в результате получается второе приближение к искомому результату.

11. Повторяются пункты алгоритма 8-10 до получения заданной точности решения задачи.

12. Итерационный процесс поиска решения прекращается в случае, если относительный модуль погрешности решения, получаемого на двух соседних итерациях, становится меньше заранее заданной величины.

Пример. Разработать технологию выплавки ковкого чугуна марки КЧ 30-6 ГОСТ 1215-79 с заданным уровнем технологических и механических свойств при минимальных затратах. Для выплавки чугуна в индукционной печи ИЧТ-10 использовались следующие шихтовые материалы:

- возврат собственного производства (x_1),
- стружка чугунная (x_2),
- высечка стальная (x_3) ГОСТ 2787-75,
- чугун зеркальный (x_4) ГОСТ 4755-80,
- чугун литейный (x_5) ДСТУ 3132-95,
- коксик (x_6) ГОСТ 3340-88,
- ферросилиций (x_7) ГОСТ 1415-78.

В результате обработки производственной информации найдено, что для получения качественных отливок из ковкого чугуна необходимо регламентировать его прочность при растяжении (s), относительное удлинение (d) и жидкотекучесть по спиральной пробе (r). После отсеивания незначимых факторов в качестве независимых переменных задачи выбраны содержание углерода (C, %), кремния (Si, %) и количество стальной высечки в шихте (z, %).

После обработки результатов реализации ПЭ типа 2^3 в производственных условиях были найдены нелинейные зависимости регламентируемых параметров качества от изучаемых переменных, которые в натуральном масштабе имеют следующий вид:

$$s = 83{,}6 - 13{,}2C - 24{,}9Si - 0{,}28z + 5{,}5C\,Si + 0{,}08C\,z, \qquad (10)$$

$$d = 22 - 3{,}3C - 3{,}5\,Si - 0{,}05\,z + 0{,}43\,C\,Si, \qquad (11)$$

$$r = -77{,}3 + 14\,C + 21{,}5\,Si + 1{,}26\,z + 15{,}1\,C\,Si - 0{,}39Cz. \qquad (12)$$

При решении задачи введены следующие ограничения:

на химический состав жидкого металла (с учетом угара):

$$2{,}6 < C < 3{,}05, \qquad (13)$$

$$1{,}3 < Si < 1{,}6, \qquad (14)$$

на компонентный состав шихты:

$$0{,}3 < x_1 < 0{,}4, \qquad (15)$$

$$x_3 < 0{,}4, \qquad (16)$$

$$\sum x_i = 1, \qquad (17)$$

на свойства ковкого чугуна:

$$s \geq s_н, \quad (18)$$

$$d \geq d_н, \quad (19)$$

$$r \geq r_н, \quad (20)$$

где $s_н$, $d_н$, $r_н$ – нижние допустимые значения предела прочности при растяжении, относительного удлинения и жидкотекучести.

В качестве нулевого приближения к решению задачи был принят состав шихты, используемый на Луганском литейно-механическом заводе для выплавки ковкого чугуна марки КЧ 30-6 ГОСТ 1215-79: $x_1 = 0{,}375$; $x_2 = 0$; $x_3 = 0{,}38$; $x_4 = 0$; $x_5 = 0{,}23$; $x_6 = 0{,}0075$; $x_7 = 0{,}0075$. Стоимость шихты составляла 1025,9 грн., среднее содержание химических элементов составляло: 2,73 % углерода, 1,44 % кремния, 0,5 % марганца, средние значения механических свойств имели следующие значения: прочность – 326 МПа, относительное удлинение – 9,7 %, жидкотекучесть – 0,51 м.

Разложив уравнения (10)-(12) в ряд Тейлора и ограничившись только линейными членами разложения, получим в окрестности нулевого приближения:

$$s = 62{,}1 - 5{,}3\ \mathrm{C} - 10{,}1\ \mathrm{Si} - 0{,}062\ z, \quad (21)$$

$$d = 20{,}3 - 2{,}67\ \mathrm{C} - 2{,}32\ \mathrm{Si} - 0{,}051\ z, \quad (22)$$

$$r = -136{,}8 + 35{,}8\ \mathrm{C} + 62{,}8\ \mathrm{Si} - 0{,}182\ z. \quad (23)$$

В уравнениях (18)-(20) задаем значения характеристик ковкого чугуна, отвечающих марке КЧ 30-6: $s_н = 300$ МПа, $d_н = 6\%$, $r_н = 0{,}5$ м и, подставив в них уравнения (21)-(23), получим линейные ограничения, которые в совокупности с неравенствами (13)-(17) представляют собой полную систему ограничений решаемой задачи. Решая ее по критерию (3) методом линейного программирования, находим первое приближение к искомому решению: $x_1 = 0{,}3$; $x_2 = 0{,}55$; $x_3 = 0{,}15$; стоимость шихты составила 690,03 грн.

В окрестностях полученного решения была произведена новая линеаризация уравнений (10)-(12), с учетом этого была решена новая задача линейного программирования, в результате которой было получено второе приближение к искомому решению: $x_1 = 0{,}3$; $x_2 = 0{,}48025$; $x_3 = 0{,}21765$; $x_6 = 0{,}00210$; стоимость шихты составила 681,51 грн. Ввиду расхождения между решениями, полученными в первом и втором приближениях, итерационный процесс был продолжен. В третьем приближении был получен результат: $x_1 = 0{,}30$; $x_2 = 0{,}48$; $x_3 = 0{,}218$; $x_6 = 0{,}002$, стоимость шихты составила 680,92 грн.

Сравнение результатов, полученных во втором и третьем приближениях, показывает, что они практически совпадают, поэтому последний состав шихты является оптимальным: возврат – 30 %, стружка чугунная – 48 %, высечка стальная – 21,8 %, коксик – 0,2 %. Проверка полученных рекомендаций с помощью опытно-промышленных плавок в условиях Луганского литейно-механического завода показала, что рекомендованный состав оптимальной шихты обеспечивает получение ковкого чугуна с заданным уровнем его физико-механических и технологических свойств. Значительное снижение стоимости металлошихты получено за счет существенного изменения ее состава и технологического процесса плавки чугуна в индукционной печи, что позволило устранить из состава шихты дорогостоящий передельный чугун, уменьшить количество возврата и стального лома, а в качестве основы шихты использовать чугунную стружку. Для получения высокого качества расплава он подвергался высокому перегреву и выдержке при этой температуре, а обеспечение необходимого содержания углерода в нем регулировалось с помощью науглероживания коксиком.

Вывод

Разработана и испытана в производственных условиях на процессе выплавки ковкого чугуна методика оптимального синтеза литейных сплавов, обеспечивающая получение заданных его технологических и физико-механических свойств при минимальных затратах на шихтовые материалы.

Список литературы

1. Гуляев Б.Б. Синтез сплавов. М.: Металлургия. 1984. – 160 с.
2. Воздвиженский В. М., Грачев В. А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение. – 1984. – 432 с.
3. Ketscher N., Herfurth K., Steller I. Giessereitechnik in Deutschland - Wirtschflicher Hintergrund und Chancen der Giebverfahren // Konstruction. – 1999. – Vol. 51, № 5. – S. 13-17.
4. Drovacek J. Mit Andradonik zur Selbsthilfe auf der Suche einer verantwortliche Globalitat // Giesserei Rundschau. – 1999. – V. 46. – № 7-8. – S. 3-8.
5. Рысев М.А. Системы компьютерного моделирования литейных процессов. // Литейное производство. – 2000. – №1. – С. 29-32.
6. Rabf B., Sebastian D/ Zielgerechte Custeilgestaltung wird durch C-Techniken unter-stuz // Maschinenmarkt. – 2001. – Vol. 107, – S. 44-47.
7. Under Bernhard. Virtuelltr Enticklungsprozess von Gussbauteilen // Giesserei Rundschau. – 2002. – Vol. 49. – № 7-8. – S. 109-113.

Одержано 12.06.2006

Розроблено та реалізовано методику одержання залізовуглецевих ливарних сплавів із потрібними фізико-механічними характеристиками при мінімальній вартості шихтових матеріалів.

The method of iron-carbon cast alloys receiving with given phisicomechanical characteristics at the minimal cost of charge preparing was created and realized.

УДК 669.017:539.375

Канд. техн. наук М. Н. Брыков, канд. техн. наук М. И. Андрущенко, Р. А. Куликовский

Национальный технический университет, г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ

Проведены исследования абразивного изнашивания хромистых и марганцевых метастабильных аустенитных сплавов. Показано, что при равном количестве легирующего элемента хромистые сплавы потенциально обладают большей износостойкостью по сравнению с марганцевыми.

Износ является основной причиной выхода из строя машин и оборудования. При этом наиболее интенсивным видом изнашивания является абразивное. По последним данным на долю абразивного износа приходится 40...50 % потерь, связанных с износом вообще [1].

Исследования абразивного изнашивания сталей и сплавов позволили существенно повысить срок эксплуатации различных деталей, рабочая поверхность которых контактирует с абразивной средой [2]. Однако выбор износостойких материалов зачастую ограничивается стандартными составами на основании изучения их износостойкости в тех или иных условиях изнашивания. В то же время работа по созданию новых сплавов, обладающих высокой сопротивляемостью абразивному изнашиванию, в настоящее время является крайне актуальной.

Существуют два пути повышения износостойкости сталей и сплавов при абразивном изнашивании:

- увеличение содержания карбидов или другой упрочняющей фазы;
- повышение износостойкости металлической матрицы.

При повышении износостойкости за счет упрочняющей фазы свойства металлической матрицы также важны, т.к. она должна сама противостоять разрушению и удерживать твердые частицы, не допуская их выкрашивания. Поэтому при создании новых износостойких сплавов определение оптимальной металлической матрицы является первостепенной задачей.

К настоящему времени установлено, что оптимальным структурным состоянием металлической матрицы для износостойких сталей и сплавов различной степени легирования является аустенит. В результате наших исследований абразивного изнашивания железоуглеродистых сплавов также показано, что максимальной износостойкостью в системе Fe-C обладает сплав с преимущественно аустенитной структурой [3]. Содержание углерода в данном сплаве находится на уровне 2,0 %. Этот состав является новым [4, 5] и, вероятно, мог бы использоваться для изготовления деталей, работающих в контакте с абразивом.

Однако, применение данного материала на практике может быть затруднено, поскольку для получения структуры аустенита сплав с концентрацией углерода 2,0 % необходимо нагреть под закалку до 1130 °С. При такой температуре углерод, растворяясь в аустените, тут же переходит в графит (первая стадия графитизации белых чугунов начинается даже при меньшей температуре). Поэтому время нагрева должно быть точно выдержано, чтобы обеспечить полное растворение карбидов, но не допустить начала графитизации. Это возможно в лабораторных условиях при термообработке образцов небольших размеров, но вряд ли выполнимо при производстве деталей.

Таким образом, теоретически сплавы системы Fe-C являются вполне пригодным материалом для изготовления деталей, обладающих высокой износостойкостью в условиях абразивного изнашивания. Однако практически трудно обеспечить аустенитную структуру в нелегированном железоуглеродистом сплаве, поэтому для улучшения технологичности износостойкого сплава его необходимо легировать.

Хром и марганец – основные легирующие элементы, которые используют для предотвращения графитизации. Во многих работах отмечена высокая износостойкость хромистых [6] и марганцевых [7] аустенитных сплавов при абразивном изнашивании. Однако условия испытаний образцов были различны, что не позволяет провести сопоставление результатов исследований. В связи с этим цель настоящей работы – проведение сравнительного анализа влияния хрома и марганца на сопротивляемость абразивному изнашиванию сплавов на основе железа после закалки на аустенит.

Известно, что при абразивном изнашивании высокая износостойкость сплавов, закаленных на аустенит, достигается тогда, когда определенное содержание углерода или других элементов обеспечивает температуру начала мартенситного превращения $M_н$ на уровне "комнатной" (20-35 °С) [8]. При избыточном легировании $M_н$ сдвигается в область отрицательных температур, что приводит к стабилизации аустенита и снижению износостойкости сплава.

© М. Н. Брыков, М. И. Андрущенко, Р. А. Куликовский, 2006

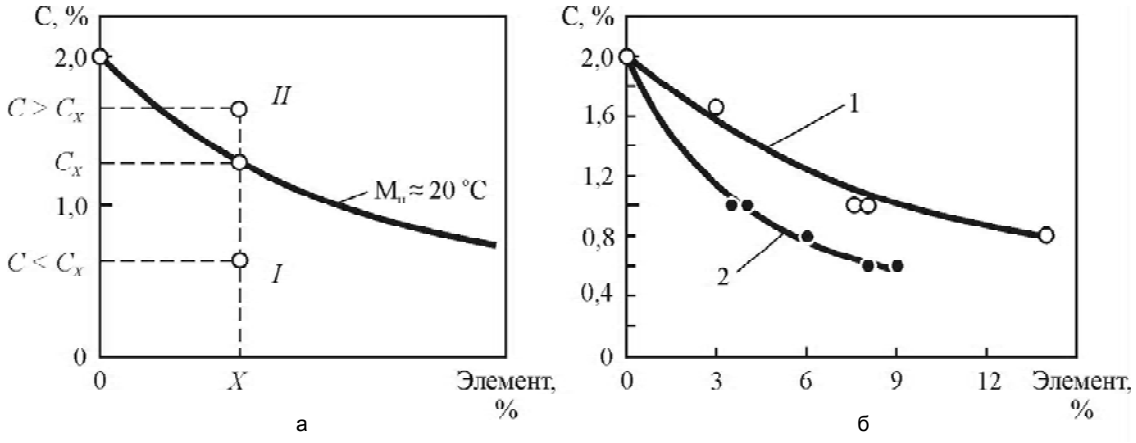


Рис. 1. Содержание углерода в аустените, достаточное для поддержания температуры $M_н$ на уровне 20 °С, в зависимости от концентрации легирующего элемента: а – схема; б – легирование хромом (1) или марганцем (2) [9, 10, 11]

Для обеспечения $M_н$ на уровне комнатной концентрация углерода в нелегированном аустените должна составлять 2,0 % [9]. Если в сплаве присутствует легирующий элемент, то необходимо меньшее количество углерода. Следовательно, существует зависимость содержания углерода, достаточного для поддержания $M_н$ на уровне комнатной, от содержания легирующего элемента (рис. 1).

При некотором содержании легирующего (X) есть только одна концентрация углерода (C_X), при которой достигается $M_н$ на уровне комнатной, что обеспечивает для данного X максимальную износостойкость при абразивном изнашивании (см. рис. 1, а). При недостаточном содержании углерода ($C < C_X$, область I) $M_н$ выше комнатной, содержание аустенита в структуре после закалки недостаточно, и износостойкость не достигает возможного максимума. При избыточном содержании углерода ($C > C_X$, область II) $M_н$ сдвигается в область отрицательных температур, аустенит стабилизируется, что также снижает износостойкость.

Таким образом, при данном содержании легирующего элемента X повышать содержание углерода более C_X нецелесообразно, т.к. это приведет к снижению износостойкости.

На рис. 1, б представлены зависимости C_X от содержания хрома (1) и марганца (2) для сплавов на основе железа [9, 10, 11]. При легировании марганцем C_X снижается гораздо интенсивнее, чем при легировании хромом.

В работе [6] проведены исследования сопротивляемости абразивному изнашиванию сплавов системы Fe-C-Cr. Испытывали сплавы двух групп. В сплавах первой группы изменяли содержание углерода (0,5…1,7 %) при постоянном содержании хрома (3,0 %). В сплавах второй группы изменяли содержание хрома (3,0…19,0 %) при постоянном содержании углерода (0,5 %). Все образцы закаливали из однофазной области для получения максимально возможного содержания аустенита в структуре.

В каждой группе имеется сплав соответствующего химического состава, для которого $M_н$ находится на уровне комнатной. Для первой группы это сплав с содержанием 1,7 %C и 3,0 %Cr. Для второй – 0,5 %C и 19,0 %Cr. Несмотря на то, что $M_н$ для обоих сплавов практически одинаковы и, соответственно, одинаково содержание аустенита, износостойкость первого сплава оказалась в 5 раз выше износостойкости второго (условия испытаний [6]). Следовательно, для достижения высокой износостойкости при абразивном изнашивании необходимо обеспечить не только $M_н$ на уровне комнатной, но и повышенное содержание углерода в аустените.

Рассматривая рисунок 1, б с этой точки зрения можно утверждать, что хром позволяет достигать большего содержания углерода C_X в износостойком сплаве при равном количестве легирующего элемента.

Допустим, исходя из технологических требований, необходимое содержание легирующего элемента составляет 3,0 %. Тогда при легировании хромом максимальная износостойкость достигается при содержании углерода 1,7 %, а при легировании марганцем – лишь 1,2 % (см. рис 1, б).

Для проверки этого предположения следует провести испытания на абразивное изнашивание двух групп сплавов, легированных хромом или марганцем. Содержание легирующего элемента для всех сплавов одинаково. Содержание углерода выбирается так, чтобы обеспечить различные варианты $M_н$. Термическая обработка образцов всех сплавов – закалка из однофазной γ-области.

Испытания хромистых сплавов на абразивное изнашивание при содержании хрома 3,0 % уже проведены в работе [6]. Максимальное содержание углерода в испытанных сплавах – 1,7 %. При данном содержании хрома увеличение содержания углерода нецелесообразно в связи с появлением карбидов.

В результате испытаний установлено, что максимальная износостойкость хромистых сплавов достигается при содержании углерода 1,7 % (рис. 2, а) [6]. При этом $M_н$ находится на уровне комнатной.

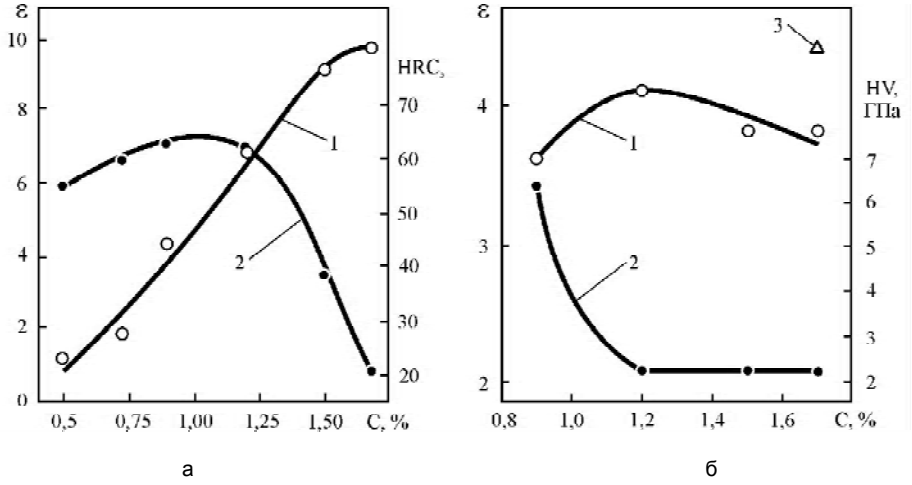


Рис. 2. Относительная износостойкость ε и твердость легированных сплавов с различным содержанием углерода после закалки из однофазной γ-области:а – 3 % Cr, условия испытаний [6]: 1 – относительная износостойкость, 2 – твердость HRC$_э$; б – 3 % Mn, испытания в условиях ГОСТ 17367-71: 1 – относительная износостойкость, 2 – твердость HV, 3 – результат испытания сплава 1,7 %C-3,0 %Cr

Для испытания марганцевых сплавов изготовлена серия образцов с различным содержанием углерода при концентрации марганца 3,0 %. Химический состав образцов и температура закалки представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Температура закалки образцов, легированных 3 % марганца

Содержание углерода, %	Температура закалки, °С
0,9	890
1,2	930
1,5	1030
1,7	1120

Испытания на изнашивание проводили в условиях, регламентируемых ГОСТ 17367-71. Абразивная поверхность – электрокорундовая шкурка.

В результате испытаний установлено (см. рис. 2, б), что максимальной износостойкостью ε = 4,1 обладает сплав с содержанием углерода 1,2 % при твердости 2,2 ГПа. Температура $M_н$ для этого сплава находится на уровне комнатной (см. рис. 1, б). Сплавы с большим содержанием углерода обладают меньшей износостойкостью. Избыточный углерод снижает $M_н$, стабилизирует аустенит и уменьшает износостойкость.

Сплав с содержанием углерода 0,9 % при твердости 6,3 ГПа также обладает существенно меньшей износостойкостью, чем сплав 1,2 % С. Здесь $M_н$ значительно выше комнатной, поэтому содержание аустенита в структуре недостаточно для достижения максимальной износостойкости.

Таким образом, при содержании легирующего элемента в количестве 3 % максимальная износостойкость после закалки на аустенит достигается при содержании углерода 1,7 % (легирование хромом) или 1,2 % (легирование марганцем). В результате испытаний сплава 1,7 %C-3,0 %Cr в соответствии с требованиями ГОСТ 17367-71 установлено, что износостойкость данного сплава составляет ε = 4,4 (точка 3 на рис. 2, б). Это позволяет сравнивать потенциал хромистых и марганцевых сплавов как износостойких материалов.

При легировании марганцем максимальная износостойкость достигается при меньшем содержании углерода, поэтому максимум износостойкости для марганцевых сплавов ниже максимума для хромистых. Повышение содержания углерода в марганцевых сплавах не увеличивает, а уменьшает износостойкость из-за сдвига $M_н$ в область отрицательных температур и стабилизации аустенита.

Выводы

Обеспечение температуры начала мартенситного превращения $M_н$ на уровне комнатной – необходимое, но не достаточное условие высокой износостойкости сплавов со структурой аустенита. Высокая износостойкость метастабильных аустенитных сплавов достигается лишь при повышенном содержании углерода.

Проведены исследования сопротивляемости абразивному изнашиванию сплавов со структурой метастабильного аустенита, легированных хромом и марганцем. Установлено, что хромистые сплавы позволяют достигать более высокой износостойкости, чем марганцевые. Марганец снижает температуру начала мартенситного превращения гораздо интенсивнее, чем хром. Поэтому при равном содержании легирующего элемента и условии $M_н \approx 20$ °С в сплаве, легированном хромом, содержится большее количество углерода, чем в сплаве, легированном марганцем.

Дальнейшая работа может быть направлена на создание новых износостойких легированных сплавов и исследование их сопротивляемости изнашиванию в различных условиях эксплуатации деталей машин и оборудования.

Список литературы

1. Шейнман Е.Л. Абразивный износ. Обзор американской печати // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – №1. – С. 100-111.
2. Брыков Н.Н. Проблема сопротивляемости сталей и сплавов абразивному изнашиванию / Н.Н.Брыков, М.Н.Брыков // Problems of Tribology. – 2006. – №1. – С. 93-107.
3. Брыков М.Н. Абразивное изнашивание железоуглеродистых сплавов // Трение и износ. 2006. – Т.27. – №1. – С. 105-109.
4. Брыков М.Н. Применение железоуглеродистых сплавов в условиях абразивного изнашивания // Problems of Tribology. – 2005. – №2. – С. 147-151.
5. Пат. 10451, Україна, МКИ С22С38/36. Зносостійкий сплав / М.М.Бриков, М.М.Бриков (Україна). – Опубл. 15.11.05, Бюл. №11. – 3 с.
6. Андрущенко М.И., Рузов О.Э., Куликовский Р.А., Брыков Н.Н. Влияние углерода и хрома на способность к упрочнению и износостойкость бескарбидных сталей в условиях абразивного изнашивания // Problems of Tribology. – 2003. – №2. – С. 112-116.
7. Счастливцев В.М. Роль принципа метастабильности аустенита Богачева-Минца при выборе износостойких материалов / В.М.Счастливцев, М.А.Филиппов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – №1. – С. 6-9.
8. Brykov N.N. Abrasive wear of steels and alloys / N.N.Brykov, M.N.Brykov, A.D.Koval // Problems of Tribology. – 2003. – №3. – С. 85-103.
9. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Оборонгиз, 1963. – 464 с.
10. Филиппов М.А. Стали с метастабильным аустенитом / М.А. Филиппов, В.С. Литвинов, Ю.Р. Немировский. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
11. Воробьев В.Г. Влияние легирующих элементов на температуры мартенситных превращений. I. / В.Г.Воробьев, А.П.Гуляев // Журнал технической физики. – 1951. – Т.XXI. – №10. – С. 1157-1163.

Одержано 20.09.2006

Проведено дослідження абразивного зношування хромистих і марганцевих метастабільних аустенітних сплавів. Показано, що при однаковій кількості легувального елемента хромисті сплави потенційно мають більшу зносостійкість у порівнянні з марганцевими.

The investigations of abrasive wear of chromium and manganese metastable alloys were carried out. It was shown that with equal content of alloying element chromium alloys posess potentially higher wear resistance compared to marganese ones.

УДК 669.2/.8-034.7

Канд. техн. наук В. А. Шаломеев[1], Н. А. Лысенко[2],
В. В. Клочихин[2], д-р техн. наук Э. И. Цивирко[1]

[1] ОАО “Мотор Сич”; [2] Национальный технический университет, г. Запорожье

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАФИНИРОВАНИЯ ПЕЧНЫХ ДОННЫХ ОСТАТКОВ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ-5

Разработана ресурсосберегающая технология рафинирования печных донных остатков при выплавке магниевого сплава МЛ-5 путем его фильтрации перед заливкой в форму. Данная технология позволяет получать металл, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 2856-79. При этом обеспечивается повышение выхода годного магниевого литья и снижение безвозвратных потерь сплава при производстве отливок.

В настоящее время особенно актуальным стала разработка ресурсосберегающих технологий, направленных на экономию энергоресурсов.

В промышленных условиях сплав МЛ-5 выплавляется в газовых печах, где по технологии предусмотрено использование лишь 80 % металла от объема выплавленного. Оставшаяся часть сплава (донные остатки) загрязнена рафинировочными флюсами и не может быть использована для получения литья.

Изучали возможность использования печных донных остатков сплава МЛ-5 путем фильтрации расплава. В качестве фильтров использовали широко применяемые и недорогие материалы: известняк, магнезит, графит (электродный бой) [1], а также комплексный фильтр (33 % известняка + 33 % магнезита + 33 % графита), которые предварительно измельчали до фракции 10-50 мм и прокаливали при температуре 500 °С. Сплав МЛ-5 выплавляли по серийной заводской технологии и разливали в песчано-глинистые формы. Оставшийся печной донный остаток заливали в песчано-глинистые формы для получения образцов. В опытных формах съемную литниковую чашу с ис-

© В. А. Шаломеев, Н. А. Лысенко, В. В. Клочихин, Э. И. Цивирко, 2006

следуемыми фильтрующими материалами устанавливали над стояком (рис. 1). Для сравнения, заливали форму без фильтра (вариант "0"), затем с фильтрами – магнезит (вариант "1"), графит (вариант "2"), известняк (вариант "3") и комплексный (вариант "4").

В объем исследования входило определение химического состава, физико-механических свойств и микротвердости сплава МЛ-5 полученных вариантов фильтрации.

Временное сопротивление разрыву ($\sigma_в$) и относительное удлинение (δ) при комнатной температуре определяли на образцах диаметром 12 мм, прошедших термообработку (закалка с температуры $415^{\pm 5}$ °С (время выдержки 15 часов) – охлаждение на воздухе; старение при температуре $200^{\pm 5}$ °С (время выдержки 8 часов) – охлаждение на воздухе) на разрывной машине Р5. Физическую плотность определяли на аналитических весах AW-21 методом взвешивания образцов в воде и на воздухе.

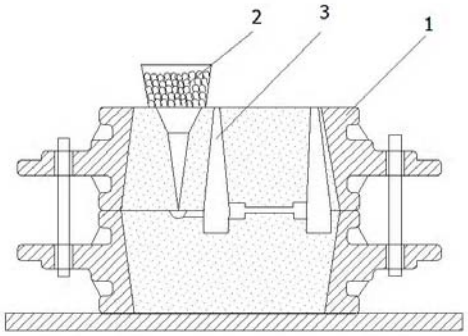


Рис. 1. Схема литейной формы с фильтром для получения образцов: 1 – опока; 2 – съемная литниковая чаша с фильтрующим материалом; 3 – литейная полость формы

Микроструктуру изучали методом оптической микроскопии ("Neofot 32") на термически обработанных образцах до и после травления в реактиве, состоящем из 1 % азотной кислоты, 20 % уксусной кислоты, 19 % дистиллированной воды, 60 % этиленгликоля.

Определение микротвердости производили на микротвердомере фирмы "Buehler" при нагрузке индентора равной 10 г.

Микрорентгеноспектральный анализ структурных составляющих осуществляли на электронном микроскопе "JSM-6360LA".

Химический состав исследуемого сплава после различных вариантов фильтрации удовлетворял требованиям ГОСТ 2856-79 [2] и по содержанию основных элементов находился примерно на одном уровне (таблица 1).

Фрактографическое исследование изломов показало, что фильтрация загрязненного расплава способствовала получению более мелкокристаллической структуры по сравнению с крупнозернистым строением нефильтрованного металла (рис. 2). Наиболее дисперсное строение наблюдалось в изломах образцов, залитых по 3-му и 4-му вариантам.

Таблица 1 – Химический состав сплава МЛ5 после различных вариантов фильтрации*)

Вариант фильтрации	Массовая доля элементов, %			
	Al	Mn	Zn	Fe
0	8,60	0,20	0,32	0,01
1	8,65	0,26	0,33	0,022
2	8,65	0,26	0,32	0,023
3	8,70	0,29	0,33	0,025
4	8,60	0,31	0,30	0,026
Нормы ГОСТ 2856-79	7,5…9,0	0,15…0,5	0,2…0,8	≤ 0,06

*) *Массовая доля меди не превышает 0,01 %, кремния – 0,05 %.*

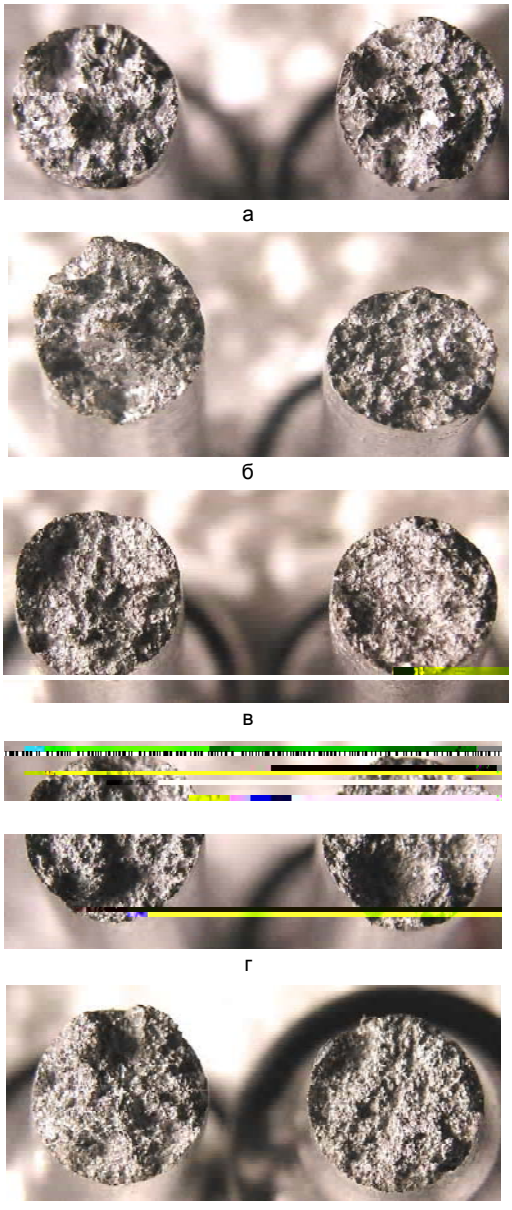


Рис. 2. Структура изломов разрывных образцов из сплава МЛ-5 после различных вариантов фильтрации (× 2,5): а – без использования фильтра – 0; б – магнезит – 1; в – графит – 2; г – известняк – 3; д – 33 % магнезита + 33 % графита + 33 % известняка – 4

Микротвердость матрицы (δ-твердый раствор) и структурных составляющих (эвтектика и интерметаллидная фаза) в образцах после различных вариантов фильтрации находилась примерно на одном уровне, но несколько выше, чем в нефильтрованном сплаве (вариант 0) (табл. 3).

Анализ результатов механических испытаний позволил установить, что фильтрация расплава(вариант 1…4), способствовала улучшению как прочностных ($\sigma_в$), так и пластических (δ) свойств в сравнении с нефильтрованным металлом. Более высокие значения механических свойств получены на образцах металла, профильтрованного через комплексный фильтр (вариант 4). Кроме того, для него характерна высокая стабильность полученных результатов (табл. 4).

Повышение физико-механических свойств отливок печного донного остатка сплава МЛ-5, прошедшего фильтрацию, обусловлено измельчением зерна и некоторым упрочнением структурных составляющих, что позволяет использовать его для получения годных отливок, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 2856-79.

Таблица 3 – Микротвердость сплава МЛ-5 после различных вариантов фильтрации

Вариант фильтрации	Микротвердость, HV, МПа		
	δ-матрица	эвтектика δ+γ(Mg_4Al_3)	интерметаллидная фаза γ(Mg_4Al_3)
0	894,1…1017,3	1368,9…2288,9	2627,6…5150,0
1	973,5…1064,0	1368,9…2627,6	2627,6…5150,0
2	1064,3…1114,1	1504,7…2627,6	3047,3…5150,0
3	1064,3…1114,1	1504,7…2627,6	3296,0…5150,0
4	1064,3…1114,1	1504,7…2627,6	4256,2…6358,0

Таблица 4 – Физико-механические свойства сплава МЛ-5 после различных вариантов фильтрации

Вариант фильтрации	Физико-механические свойства при комнатной температуре		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	Физическая плотность, г/см^3
0	185,0	6,2	1,6858
1	232,0	9,2	1,6980
2	225,0	7,3	1,6753
3	246,0	9,8	1,6876
4	275,0	12,8	1,7067
ГОСТ 2856-79	≥ 230,0	≥ 2,0	–

Выводы

1. Проведены исследования по опробованию различных фильтрующих материалов для очистки печных донных остатков сплава МЛ-5. Установлено, что применение известняка, магнезита или графита позволяет улучшить свойства металла и перевести его в разряд годного.

2. Предложен комплексный фильтр (33 % магнезита + 33 % графита + 33 % известняка), обеспечивающий более высокий уровень свойств при фильтрации печных донных остатков магниевого сплава.

3. Данная технология позволяет повысить выход годного литья из магниевых сплавов и получить значительный экономический эффект.

Список литературы

1. Альтман М.Б., Белов А.Ф., Добаткин В.И. и др. Магниевые сплавы. Справочник ч. 2. – М.: Металлургия, 1978. – 294 с.
2. ГОСТ 2856-79. Сплавы магниевые литейные. – М.: Госстандарт СССР.

Одержано 6.09.2006

Розроблено ресурсозберігальну технологію рафінування пічних донних залишків при виплавці магнієвого сплаву МЛ-5 шляхом його фільтрації перед заливанням у форму. Ця технологія дозволяє одержувати метал, що задовольняє вимогам ДСТ 2856-79. При цьому, забезпечується підвищення виходу придатного магнієвого лиття і зниження безповоротних утрат сплаву при виробництві виливків.

The new resource saving technology of oven base waste affinage during manganese alloy МЛ-5 melting by means of it's filtration before form casting was developed. This technology permits to receive metal which satisfies ГОСТ 2956-79 standard requirements. The output of manganese cast is rising and the irretrievable losses of alloy during casting production is reduced.

УДК 621.793.6: 621.785.5

Д-р техн. наук Б. П. Середа[1], И. В. Палехова[2]

[1] Государственная инженерная академия, [2] ООО НПФ “Днепростар”, г. Запорожье

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СВС-ТЕХНОЛОГИИ

Показаны результаты исследований структуры и свойств комплексных титановых покрытий, полученных в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при различных способах обработки. Приведены сравнительные данные эксплуатационных характеристик СВС-покрытий и диффузионных покрытий, полученных методом химико-термической обработки.

Введение

Для деталей машин и оборудования, работающих в сложных эксплуатационных условиях, большое значение имеют свойства поверхностного слоя. В большинстве случаев для поверхностного упрочнения применяют различные методы и способы химико-термической обработки (ХТО). Одним из эффективных способов ХТО, позволяющим повысить твердость, износостойкость, коррозионную стойкость железоуглеродистых сплавов, является диффузионное насыщение несколькими карбидообразующими элементами (титаном и хромом). При этом продолжительность технологического процесса значительна (10-15 ч) [1, 2], что приводит к повышению себестоимости изделий. В связи с чем, актуально применение технологий, позволяющих получать покрытия при ограниченном или минимальном времени их формирования. Одной из таких технологий является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

СВС представляет собой высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения [3]. В основу данного метода нанесения покрытий положен принцип газотранспортных химических реакций [4-6]. Данный процесс характеризуется интенсивным нанесением покрытий благодаря наличию градиента температуры в системе изделие – порошковая среда, который позволяет осуществлять массоперенос насыщающих элементов на поверхность изделия [7].

Известно, что совместная диффузия элементов возможна только в определенном, достаточно узком интервале концентраций, при этом невозможно получить покрытия значительной толщины и высокие концентрации в поверхностном слое обоих насыщающих элементов [8, 9]. В этом случае эффективным может оказаться последовательный способ обработки.

Целью данной работы является разработка порошковых СВС-смесей для нанесения титанохромированных покрытий, сравнительный анализ технологических параметров СВС-процесса, структуры, фазового, химического состава и свойств покрытий, полученных при одновременном и последовательном способе нанесения, а также оценка эффективности применения последовательной технологии СВС-процесса.

Методика проведения исследования

В работе для нанесения покрытий использовали образцы из железа технической чистоты и сталей массового назначения (сталь 20, сталь 45, У8). Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа ($P = 10^5$ Па) при рабочем интервале температур 950÷1100 °С и общей продолжительности изотермической выдержки 120 минут (как для одновременного, так и для последовательного способа насыщения). Для приготовления реакционных СВС-смесей использовали порошки оксидов хрома и алюминия, титана, хрома, алюминия технической чистоты, металлического йода дисперсностью 200-350 мкм. Нанесение покрытий проводили в режиме теплового самовоспламенения СВС-процесса. Подготовка поверхности образцов включала последовательные стадии шлифовки, полировки и обезжиривания в ацетоне. Инициирование процесса насыщения осуществляли путем предварительного нагрева в печи сопротивления до температуры начала самовоспламенения (скорость нагрева – 0,5 °С/с). Температуры СВС-смеси контролировали хромель-алюмелевой термопарой в защитном чехле, введенной непосредственно в объем шихты, и подключенной к потенциометру серии КСП. Толщину упрочненных слоев исследовали на световом микроскопе “Neophot-21” при увеличении 500. Микроструктуру выявляли методом травления в 3 % спиртовом растворе пикриновой кислоты (ТУ 6-09-08-317-80). Для выявления границ зерен феррита использовали 4 % спиртовый раствор азотной кислоты [10].

© Б. П. Середа, И. В. Палехова, 2006

Анализ фазового состава покрытий осуществляли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Исследование элементного состава проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с применением микроанализатора JEOL "Superprob-733". Локальность анализа 1 мкм^2 , глубина анализа ~ 1 мкм. Микродюрометрический анализ проводили на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76) при нагрузке на индентор 0,098 Н и 0,196 Н. Испытания на износостойкость проводили при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 23.208-79) на установке СМТ-1. Для создания абразивно-масляной среды в масляную ванну машины трения добавляли абразивный материал, приготовленный из кварцевого песка (ГОСТ 2138-84), при его концентрации 3±0,5 % по массе. Испытания на жаростойкость осуществляли на цилиндрических образцах диаметром 10,0±0,2 мм и высотой 20,0±0,5 мм (ГОСТ 6130-71) в изотермических условиях с последующим взвешиванием на аналитических весах. Коррозионная стойкость образцов с покрытиями оценивалась в 3 % растворе NaCl и 10 % растворе H_2SO_4 при 20 °С.

Результаты исследования и их обсуждение

Эффективность обработки в условиях СВС определяется временными параметрами процесса и теплофизическими характеристиками экзотермических смесей.

Образование покрытий в режиме теплового самовоспламенения можно разделить на пять последовательных стадий: инертный прогрев реакционной смеси до температуры самовоспламенения, тепловое самовоспламенение, прогрев изделий, изотермическая выдержка, охлаждение. Продолжительность первой стадии в определенной степени зависит от состава смеси и ее тепловых характеристик. Вторая стадия характеризуется протеканием основных экзотермических реакций (для процесса титанохромирования скорость реакции воспламенения составляет 5-6 °С/с), а также образованием газообразных соединений и переносом насыщающих элементов к подложке. Термодинамический анализ равновесного состава продуктов системы свидетельствует, что в исследуемом диапазоне температур основными составляющими газовой фазы являются I, I_2, AlI_2, CrI, CrI_2, CrI_3, TiI_4. При этом увеличение концентрации в шихте газотранспортного агента (металлического йода) до 2-4 % приводит не только к увеличению количества газообразных йодидов насыщающих элементов, но и к увеличению скорости реакции воспламенения. На третьей стадии происходит снижение температуры до расчетной температуры насыщения. При этом начинается формирование покрытия. На стадии изотермической выдержки происходит диффузионный рост покрытия. Протекают процессы, аналогичные насыщению в изотермических условиях. На стадии охлаждения формирование слоя происходит менее интенсивно, что объясняется уменьшением коэффициентов диффузии насыщающих элементов. Причем размер зерен покрытия зависит от скорости охлаждения.

Исследования показали, что максимальная скорость роста покрытий наблюдается на начальных этапах СВС-процесса. Это объясняется тем, что аустенит, образующийся при резком повышении температуры на стадии теплового самовоспламенения, характеризуется высокой плотностью дислокаций и мелкозернистостью. В связи с этим его диффузионная восприимчивость увеличивается.

Таким образом, регулируя температурные условия процесса, можно управлять как скоростью роста слоев, так и их структурой.

На температурной кривой выделяют две характерные точки – температуру начала воспламенения t_* и температуру максимального разогрева t_m, которые зависят от состава реакционной смеси. Увеличение концентрации в шихте активной экзотермической составляющей и газотранспортного агента (I_2) приводит к снижению t_* и росту t_m.

На толщину формируемых покрытий влияют состав шихты, продолжительность и температура изотермической выдержки, химический состав подложки и способ насыщения.

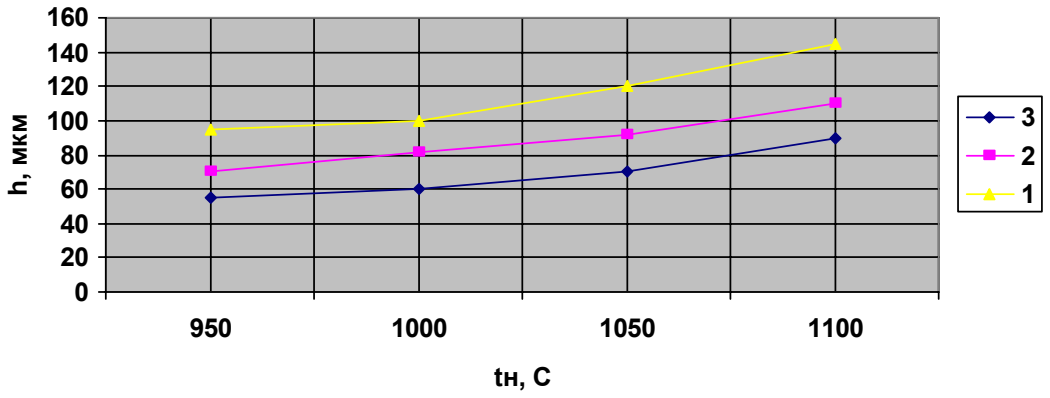
На рис. 1 представлены зависимости толщин комплексных Ti-Cr покрытий, полученных на технически чистом железе и стали У8 (при последовательном и совместном способах обработки), от температуры изотермической выдержки. Повышение температуры насыщения приводит к росту толщины диффузионного слоя.

Установлено, что при совместном способе обработки, основным фактором, влияющим на толщину покрытия, является концентрация легирующих элементов в реакционной смеси. При этом, при титанохромировании способом СВС, поставщиком активных атомов хрома является как металлический хром, так и хромистая составляющая (ХС). При насыщении в смесях, содержащих ХС и титан или ХС, титан, хром (общее количество хрома в смеси идентично), большая толщина покрытия достигается при наличии хрома в смеси в несвязанном состоянии.

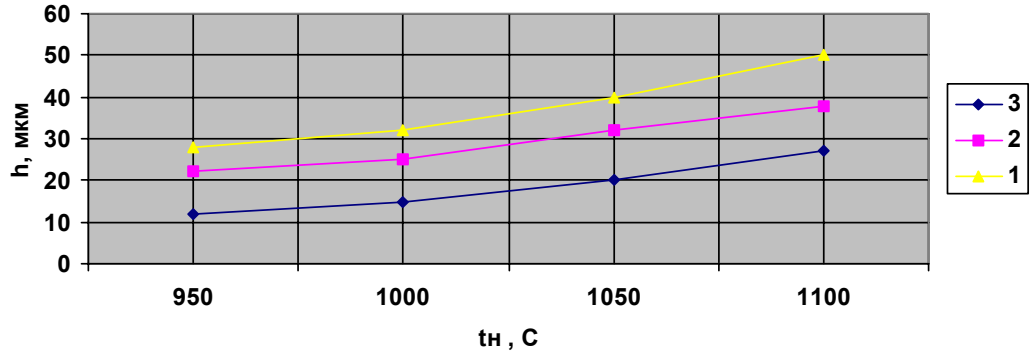
При двухстадийном способе обработки, основное влияние оказывает последовательность насыщения. Если на первой стадии проводится диффузионное насыщение титаном, а на второй – хромом, то общая толщина слоя выше, чем при насыщении хромом, а потом титаном. Это связано с тем, что хром снижает диффузионную активность титана, а образовавшийся карбидный слой препятствует диффузии титана вглубь подложки [11].

С увеличением концентрации углерода в подложке, толщина покрытия уменьшается.

По результатам рентгеноструктурного и металлографического анализов установлено, что на поверхности образуется сплошной, однородный, не травящийся слой. К нему примыкает переходная зона, образовавшаяся в результате встречной диффузии углерода, а за ней – обедненная углеродом ферритная зона (рис. 2).



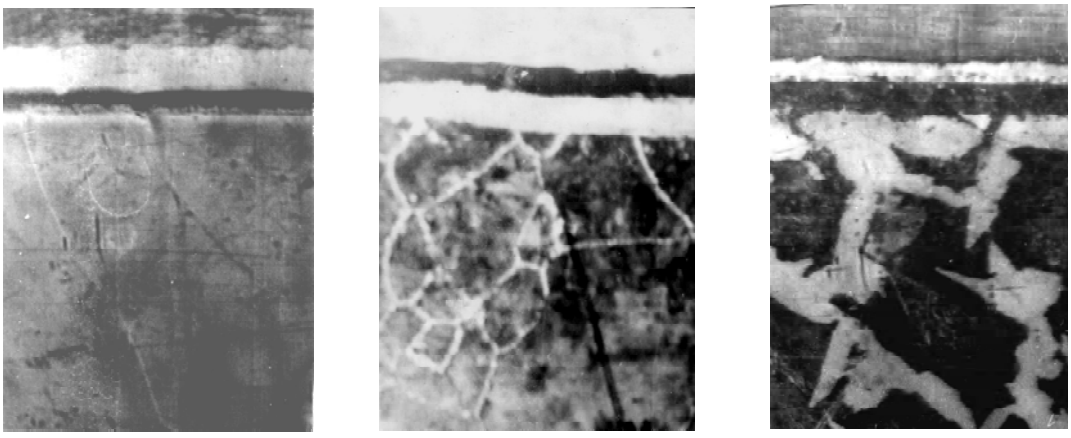
а



б

Рис. 1. Влияние температуры изотермической выдержки на толщину титанохромированных слоев, полученных на технически чистом железе (а) и стали У8 (б) в режиме теплового самовоспламенения при различных способах насыщения. Продолжительность изотермической выдержки $\tau_в$ = 120 мин:

1 – последовательное насыщение титаном и хромом;
2 – одновременное насыщение титаном и хромом;
3 – последовательное насыщение хромом и титаном



а б в

Рис. 2. Микроструктуры титанохромированных покрытий, полученных методом СВС ×500. Температура насыщения – 1000 °С, продолжительность изотермической выдержки – 120 мин:

а – железо технической чистоты; б – сталь 20; в – сталь 45

Фазовый состав зон в значительной степени зависит от содержания углерода в стали и способа насыщения.

При совместном способе на поверхности образцов из технически чистого железа образуются соединения титана с хромом, представляющие собой продукт СВС-взаимодействия. Содержание титана и хрома в поверхностном слое достигает 66 % и 34 % (соответственно). На образцах из углеродистых сталей образуются карбиды сложного состава (Ti, Cr)C.

В данных условиях насыщения, хром обладает большим коэффициентом диффузии, чем титан, а также благодаря меньшему атомному радиусу легче образует твердые растворы внедрения. В связи с чем, проникает в подложку на большую глубину, чем титан. В зависимости от содержания углерода в стали, в приповерхностной зоне возможно образование карбидов $(Cr, Fe)_{23}C_6$ или $(Cr, Fe)_7C_3$, легированных титаном, ниже располагается зона твердого раствора Cr в α-железе.

При двухстадийном способе обработки, фазовый состав покрытий зависит в первую очередь от последовательности насыщения. При титанировании с последующим хромированием на поверхности углеродистых сталей образуются карбиды (Ti, Cr)C (с содержанием Ti – 42 %, Cr – 46 %). Ниже расположены зоны карбидов и α-твердого раствора.

Если на первой стадии проводят насыщение хромом, а затем титаном, то происходит преимущественное хромирование. На поверхности сталей возможно образование высшего карбида Cr_3C_2 с некоторыми включениями Cr_2Ti (концентрация Cr достигает 78 %, концентрация титана незначительна).

При исследовании защитных слоев на приборе ПМТ-3 установлено, что микротвердость соединений хрома с титаном на поверхности технически чистого железа составляет 1800-2000 МПа. Микротвердость карбидов (Ti, Cr)C на поверхности углеродистых сталей изменяется в пределах 16500-25000 МПа.

Как показали проведенные испытания, износостойкость, коррозионная стойкость и жаростойкость образцов с покрытиями, наносимыми при различных способах обработки, существенно не отличаются. Поэтому больший интерес представляет сравнение этих свойств покрытий, полученных методом СВС и ХТО в изотермических условиях.

Исследования проводили на образцах из стали 45 с титанохромированными СВС-покрытиями, полученными при продолжительности изотермической выдержки – 120 минут и аналогичными диффузионными покрытиями, нанесенными при продолжительности обработки 8 ч (толщина покрытий в обоих случаях примерно одинакова). По результатам испытаний установлено повышение износостойкости СВС-покрытий по сравнению с аналогом на 65-70 %, жаростойкости – в 1,3-1,5 раз, коррозионной стойкости – в 1,5-1,7 раза. Это объясняется дополнительным микролегированием зерен покрытия алюминием, что связано с особенностями СВС-процесса.

Выводы

1. Газотранспортная СВС-технология позволяет получать на сталях качественные титанохромированные покрытия.

При этом способ насыщения (последовательный или совместный) влияет на толщину, фазовый и химический состав покрытий.

2. Для получения покрытий значительной толщины может быть рекомендована двухстадийная СВС-технология. Последовательное насыщение титаном и хромом обеспечивает достаточно высокие концентрации этих элементов в поверхностном слое.

3. Титанохромированные стали с СВС-покрытиями по сравнению с диффузионными аналогами обладают улучшенными эксплуатационными свойствами при снижении продолжительности обработки в 4 раза.

Список литературы

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л.С. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Филоненко Б.А. Комплексные диффузионные покрытия. – М.: Машиностроение, 1981. – 136 с.
3. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов/ под ред. В.Т. Телепы, А.В. Хачояна. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
4. Шефер Г. Химические транспортные реакции. – М.: Мир, 1964. – 189 с.
5. Kostogorov E.P. Transport reactions in SHS combastion// Int/ Journal of SHS. – 1992. – V.1, №1. – p. 33-39.
6. Grigor'ev Y.M., Merzhanov A.G. SHS coatings / Int. J. of SHS, 1992, v.1, №4. – p. 600-639.
7. Коган Я.Д., Середа Б.П., Штессель Э.А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВС / Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6. – С. 39-40.
8. Земсков Г.В., Коган Р.Л. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
9. Многокомпонентные диффузионные покрытия/ под ред. Ляховича Л.С. – Минск: Наука и техника, 1974. – 289 с.
10. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
11. Шатинский В.Ф., Нестеренко А.И. Защитные диффузионные покрытия. – К.: Наук. думка, 1988. – 272 с.

Одержано 12.10.2006

Показано результати досліджень структури і властивостей комплексних титанових покриттів, що отримані в умовах самопоширеного високотемпературного синтезу при різних способах обробки. Наведено порівнювальні дані експлуатаційних характеристик СВС-покриттів і дифузійних покриттів, що отримані методом хіміко-термічної обробки.

The results of structure and properties investigation of complex titanium coatings received by selfspreading hight-emperature synthesis (SHS) in different ways of processing were shown.The comparative data of SHS coatings and diffusion coatings received by chemical-thermal treatment exploitation characteristics is given.

IV МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 519.3

Д-р фіз.-мат. наук В. І. Пожуєв, Ф. В. Прасад

Державна інженерна академія, м. Запоріжжя

РОЗВ'ЯЗАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ НЕОДНОРІДНИХ ОБОЛОНОК З ПІДКРІПЛЕНИМИ ОТВОРАМИ

Розроблено програмну оболонку, що дозволяє розв'язувати нестаціонарні задачі теплопровідності за методом Галеркіна методом скінчених елементів для неоднорідних пологих і циліндрових оболонок з підкріпленими отворами.

У багатьох інженерних завданнях важливим аспектом є знання розподілу температури в тілі. Кількість тепла, що підводиться до тіла або втрачається їм, може бути обчислена, якщо відомий розподіл температури. Температурне поле, крім того, впливає на розподіл напруження. Розв'язання нестаціонарних задач теплопровідності в більшості випадків є важливішим ніж розв'язання стаціонарних задач.

Метою даної роботи було створення комп'ютерної програми, яка дозволяє моделювати неоднорідні пологі і циліндрові оболонки з підкріпленими отворами, розв'язувати нестаціонарну задачу теплопровідності за методом Галеркіна з такими граничними умовами, як температура на границі, тепловий потік і температура навколишнього середовища, а також враховувати можливість зміни граничних умов за часом.

Для реалізації мети був вибраний метод скінчених елементів, оскільки цей метод є одним з найбільш ефективних чисельних методів розв'язування математичних задач, що описують стан фізичних систем складної структури і відповідно придатних для аналізу найрізноманітніших технічних і наукових завдань.

Опис моделювання неоднорідної оболонки і переходу від глобальних до локальних координат надруковано в статті [5]. Дискретизацію області реалізовано алгоритмом генерації ірраціональних скінчено-елементних сіток Раперта [4].

Розв'язання задачі теплопровідності з конвекцією для двомірних нестаціонарних завдань має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(wk_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(wk_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)= = 2h(T-T_o)+c\rho\frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1)$$

де w – значення товщини області.

Для розв'язання задачі теплопровідності за методом Галеркіна, було вибрано лінійну апроксимацію пробної функції [6]. Згідно з цим, розподіл тепла в кожному елементі описується таким чином

$$T(x,y)=\sum_{i=1}^{3}N_i(x,y)\cdot T_i=[N]\{T\}, \quad (2)$$

де $N_i(x,y)$ – інтерполяційна функція, пов'язана з вузловою температурою T_i. Граничними умовами виступають: а) температура на границі, б) тепловий потік, в) температура навколишнього середовища, при цьому значення граничних умов б) і в) можуть залежати від часу. Основна система диференціальних рівнянь для розв'язання задачі з граничними умовами а) і б) виглядає так

$$[C^{(e)}]\{\dot{T}^{(e)}\}+[k^{(e)}]\{T^{(e)}\}=\{f_h^{(e)}\}+\{f_g^{(e)}\}, \quad (3)$$

де

$$[C^{(e)}]=c\rho\iint_A[N]^T[N]dA, \quad (4)$$

$$\left[k^e\right]=\iint_A\left(w_kk_x\left[\frac{\partial N}{\partial x}\right]^T\left[\frac{\partial N}{\partial x}\right]+w_kk_y\left[\frac{\partial N}{\partial x}\right]^T\left[\frac{\partial N}{\partial x}\right]\right)dA+ + 2h\iint_A[N]^T[N]dA, \quad (5)$$

$$\{f_h^{(e)}\}=2hT_0\iint_A\{N\}dA, \quad (6)$$

$$\{f_g^{(e)}\}=-\oint_S q_sn_s\{N\}wdS. \quad (7)$$

© В. І. Пожуєв, Ф. В. Прасад, 2006

У випадку якщо на границі задано умову типу в), система диференціальних рівнянь приймає такий вигляд:

$$[\mathrm{C}^{(e)}]\{\dot{T}^{(e)}\}+[k^{(e)}]\{T\}=\{f_h^{(e)}\}+\{f_{hS}^{(e)}\}, \quad (8)$$

де

$$[k^{(e)}]=[k^{(e)}]+h\oint_S[N]^T[N]wdS, \quad (9)$$

$$\{f_{hS}^{(e)}\}=\oint_S hT_o\{N\}wdS. \quad (10)$$

При розв'язанні задачі теплопровідності для циліндрових оболонок, записуються умови зв'язаності для температури і потіку. Для цього в матрицях C, K і F змінюються рівняння, що характеризують значення температури в одному вузлі:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & .. & .. & C_{1N} \\ C_{I_1 1}+C_{I_2 1} & C_{I_1 2}+C_{I_2 2} & .. & .. & C_{I_1 N}+C_{I_2 N} \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ 1_{I_2 I_1} & 0 & -1_{I_2 I_2} & .. & 0 \\ C_{N1} & C_{N2} & .. & .. & C_{NN} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & .. & .. & k_{1N} \\ k_{I_1 1}+k_{I_2 1} & k_{I_1 2}+k_{I_2 2} & .. & .. & k_{I_1 N}+k_{I_2 N} \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ 1_{I_2 I_1} & 0 & -1_{I_2 I_2} & .. & 0 \\ k_{N1} & k_{N2} & .. & .. & k_{NN} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_{I_1}+F_{I_2} \\ .. \\ 0 \\ F_N \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де I_1 і I_2 індекси вузлів, у яких температура і потік повинні бути рівні.

Для розв'язання задачі теплопровідності з підкріпленими отворами використовується одновимірний лінійний елемент [6, 7]. Рівняння теплопровідності для одновимірного випадку розподілу тепла з конвекцією має вигляд

$$k_x\frac{d^2T}{dx^2}=\frac{hP}{S}(T-T_o)+c\rho\frac{\partial T}{\partial t}. \quad (14)$$

Розподіл тепла в кожному елементі описується таким рівнянням

$$T(x,y)=\sum_{i=1}^{2}N_i(x,y)\cdot T_i=[N]\{T\}. \quad (15)$$

Основна система диференціальних рівнянь для розв'язання задачі з граничними умовами а) і б) має вигляд

$$[C^{(e)}]\{\dot{T}^{(e)}\}+[k^{(e)}]\{T^{(e)}\}=\{f_h^{(e)}\}+\{f_g^{(e)}\}, \quad (16)$$

де

$$[C^{(e)}]=\frac{c\rho AL}{6}\begin{bmatrix}2 & 1\\ 1 & 2\end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$[k^{(e)}]=\frac{k_x A}{L}\begin{bmatrix}1 & -1\\ -1 & 1\end{bmatrix}+\frac{hPL}{6}\begin{bmatrix}2 & 1\\ 1 & 2\end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\{f_h^{(e)}\}=\frac{hPT_0L}{2}\begin{Bmatrix}1\\ 1\end{Bmatrix}, \quad (19)$$

$$\{f_g^{(e)}\}=-Aq\begin{Bmatrix}1\\ 1\end{Bmatrix}. \quad (20)$$

У випадку, якщо на границі задано умову типу в), система диференціальних рівнянь приймає такий вигляд

$$[C^{(e)}]\{\dot{T}^{(e)}\}+[k^{(e)}]\{T^{(e)}\}=\{f_h^{(e)}\}+\{f_{hS}^{(e)}\}, \quad (21)$$

$$[k^{(e)}]=[k^{(e)}]+hA\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\{f_{hS}^{(e)}\}=hAT_0, \quad (23)$$

При моделюванні підкріплення одновимірним стержнем необхідно об'єднати системи (3) і (16). Загальна система диференціальних рівнянь без застосування граничних умов б) і в) приймає вигляд

$$\left([C^{(e)}]+[C_{П}^{(e)}]\right)\{\dot{T}^{(e)}\}+\left([k^{(e)}]+[k_{П}^{(e)}]\right)\{T^{(e)}\}= =\left(\{f_h^{(e)}\}+\{f_{h_{П}}^{(e)}\}\right). \quad (24)$$

Граничні умови для підкріпленого стержня описуються додаванням рівнянь (20) або (22, 23) у загальну систему диференціальних рівнянь.

Щоб набути значення $\{T\}$ в кожній точці часового інтервалу, необхідно розв'язати лінійне диференціальне рівняння (24). Існують два поширені методи розв'язання рівнянь такого типу. Один з них полягає в наближеній заміні часткової похідної за часом її скінчено-різницевим аналогом із застосуванням центральної різницевої схеми. Інший метод полягає у використанні скінчених елементів, визначених тепер вже не в просторовій, а в часовій області [7]. Для розв'язання

лінійного диференціального рівняння використовується другий метод, де розглядається інтервал $0 \le t \le t_k$.

Значення $\{T\}$ в кожному елементі описано рівнянням

$$\{T\} = \sum_{i=0}^{n} N_i(t) \cdot T_i \,, \qquad (25)$$

де $N_i(t)$ – відповідні функції форми, безперервні в межах даного інтервалу. При $N_0 = (\Delta t - t)/\Delta t, N_1 = t/\Delta t$, похідна за часом дорівнює

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_o}{\partial t} & \frac{\partial N_1}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T_o\} \\ \{T_1\} \end{Bmatrix} =$$

$$= \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T_o\} \\ \{T_1\} \end{Bmatrix}. \qquad (26)$$

Оскільки початкове значення $\{T_0\}$ відоме, то використовується тільки одна вагова нев'язність. Інтегруючи лінійне диференціальне рівняння та помножуючи його на N_1, маємо

$$\int_0^{\Delta t} \frac{t}{\Delta t} \left(\begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_0}{\partial t} & \frac{\partial N_1}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T_0\} \\ \{T_1\} \end{Bmatrix} + \right.$$

$$\left. + \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_0 & N_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T_0\} \\ \{T_1\} \end{Bmatrix} + \{\overline{F}\} \right) dt = 0 \,. \qquad (27)$$

Після підстановки (26) і подальшого інтегрування одержуємо

$$\frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} (-\{T_0\} + \{T_1\}) + \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \left(\frac{1}{3} \{T_0\} + \frac{2}{3} \{T_1\} \right) + \{\overline{F}\} = 0 \,. \qquad (28)$$

Знаючи значення $\{T_0\} = \{T_i\}$ у всіх вузлах, приходимо до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих $\{T_j\}$.

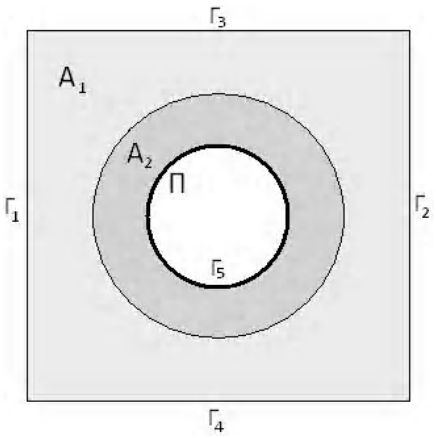
$$\left(\frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \right) \{T_j\} = \left(\frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \right) \{T_i\} + \{F\} \,, \qquad (29)$$

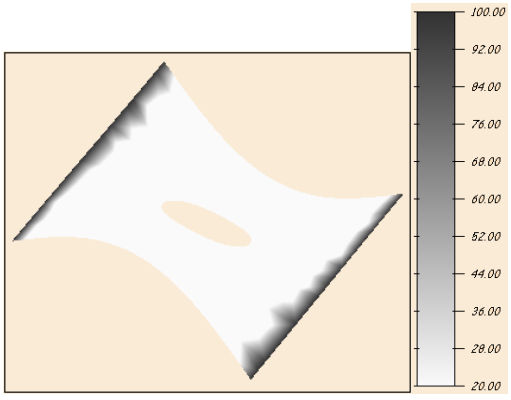
яке розв'язується за методом Холецького або Гауса (залежно від заданої оболонки).

Нижче подано приклади розв'язання задач:

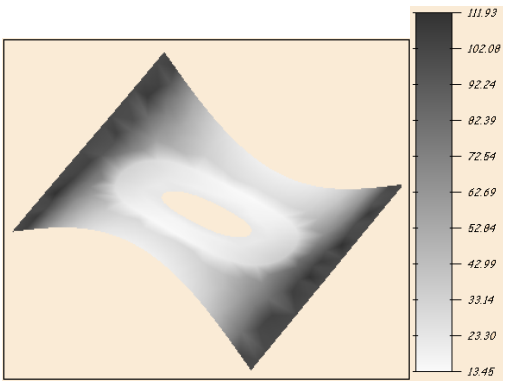
Приклад 1. Полога оболонка $z = \sin(x-1) \cdot \cos(y-1)$, $t_0 = 0$, D$t = 0{,}1$, $t_k = 15{,}4$

	w	k	C	p	h	T_0	T
A_1	0,1	31,50	0,116	7750	10	50	20
A_2	0,2	46,10	0,111	7830	0	0	20
$П$	0,2	31,50	0,116	7750	10	50	20
$Г_1$	$T = 100$ °C						
$Г_2$	$T = 100$ °C						
$Г_3$	$q = 300$ Вт/м^2						
$Г_4$	$q = 300$ Вт/м^2						
$Г_5$	$T_0 = 80$ °C						

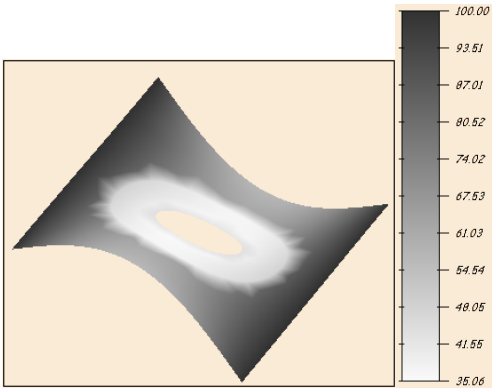




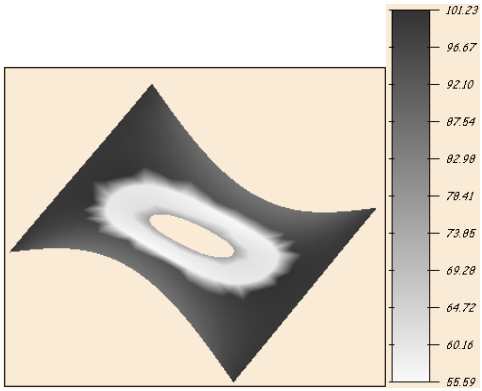
$t = 0$



$t = 0{,}1$



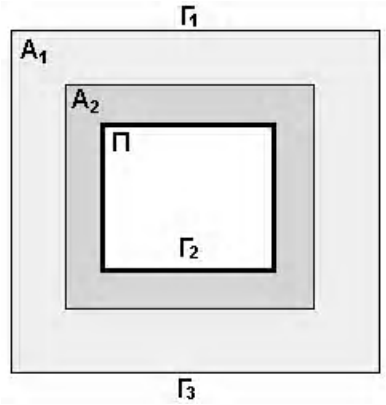
t = 1,0

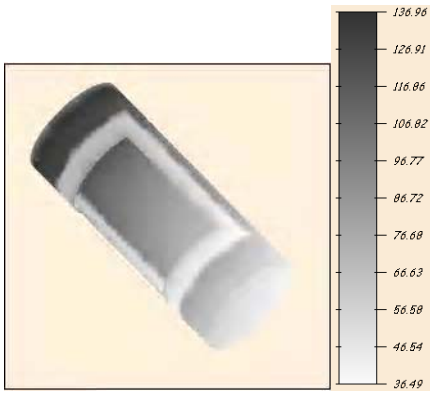


t = 15,4

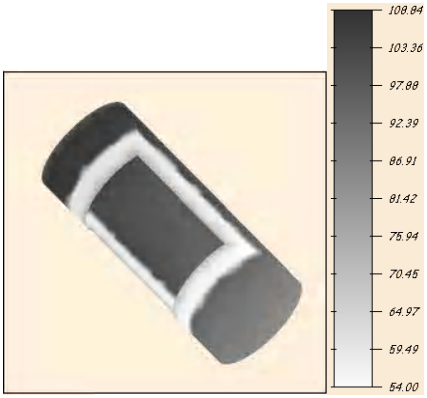
Приклад 2. Циліндрова оболонка, $t_0 = 0$, $\Delta t = 1$, $t_k = 12$

	w	$д_0$	$З$	p	h	T_0	T
A_1	0,1	31,50	0,116	7750	0	0	20
A_2	0,2	46,10	0,111	7830	0	0	20
$П$	0,2	31,50	0,116	7830	10	50	20
$Г_1$	T = 100 °C						
$Г_2$	$T_0 = 50 + 2*t$ °C						
$Г_3$	$q = 300 - 50*t$ Вт/м^2						

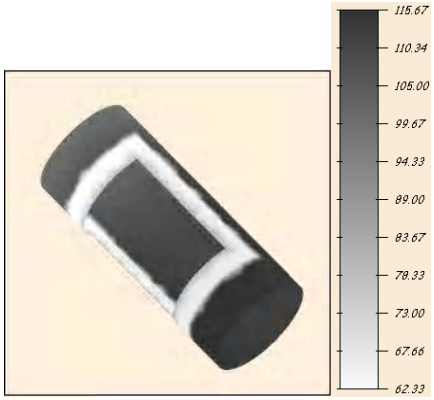




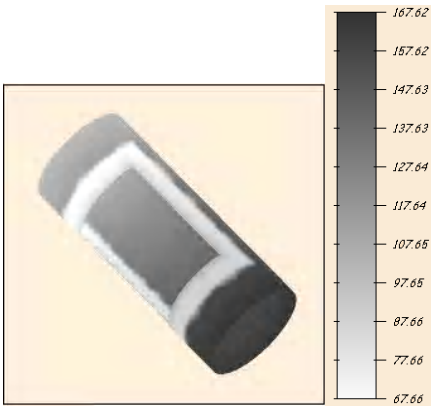
t = 1



t = 3



t = 6



t = 12

У даній роботі були розв'язанні задачі теплопровідності для наступних тіл:

- пологі оболонки з підкріпленнями (круглим, овальним, квадратним, прямокутним, трикутним);
- циліндрові оболонки з підкріпленнями (круглим, овальним, квадратним, прямокутним, трикутним).

При програмній реалізації проекту було використано мову C#, середовище візуального програмування Microsoft Visual Studio. Net 2005. У проекті використовувалася бібліотека CSOpenGL для візуалізації розв'язаних задач у тривимірному уявленні.

Перевагою даної програмної оболонки є те, що завжди існує можливість дослідження розв'язань однієї і тієї ж задачі при різній кількості скінчених елементів та граничних умов з метою вироблення певних рекомендацій.

Список літератури

1. Агапов В.П. Метод конечних элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций. М.: Издательство АСВ, 2000. – 152 с.
2. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Норри Д., Ж. де Фриз, Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. – 304 с.
4. Пожуєв В.І., Прасад Ф.В., Вирішення стаціонарних задач теплопровідності у варіаційному формулюванні методом кінцевих елементів, ISSN 1607-6885, Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні №2, 2005, Запорізький національний технічний університет, С. 99-102.
5. Пожуєв В.І., Прасад Ф.В., Вирішення стаціонарних задач теплопровідності неоднорідних оболонок з підкріпленими отворами, ISSN 1607-6885, Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні №1, 2006, Запорізький національний технічний університет, С. 107-110.
6. David V. Hutton, Fundamentals of finite element analysis, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2004. – 494 p.
7. Larry J. Segerlind. Applied Finite Element Analysis, John Wiley and Sons, Inc., New York/London/Sydney/Toronto, 1976. – 392 p.

Одержано 2.10.2006

Разработана программная оболочка, позволяющая решать нестационарные задачи теплопроводности по методу Галеркина методом конечных элементов для неоднородных пологих и цилиндрических оболочек с подкрепленными отверстиями.

The program shell which allows to solve nonstationary problems of heat conduction due to Galerkin's method is developed. These problems are solved using method of finite elements for heterogeneity sloping and cylindrical surfaces with supported holes.

УДК 285.347

Канд. техн. наук В. И. Дубровин, В. А. Клименко, канд. техн. наук А. М. Руднев

Национальный технический университет, г. Запорожье

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МОСТОВЫХ КРАНОВ

Рассмотрено решение задачи прогнозирования остаточного ресурса грузоподъемных кранов. В качестве теоретической модели распределения отказов предложено использовать диффузионное монотонное распределение. В результате проведенного анализа статистических данных построена математическая модель для оценки остаточного ресурса.

1 Введение

Проблема оценки остаточного ресурса грузоподъемных кранов существует не только в нашей стране, но и во всем мире. Морально устаревшие и физически изношенные краны традиционно меняют на новые, однако, если металлоконструкция крана спроектирована и изготовлена достаточно качественно, а возникающие в процессе ее эксплуатации дефекты своевременно исправляются, то кран может достаточно долго "не исчерпывать своего ресурса".

Практика показывает, что в зависимости от применяемых сталей, технологии изготовления и условий эксплуатации металлоконструкция крана может работать 30-40 лет и более. Затраты на модернизацию в этом случае снижаются в 3-4 и более раз по сравнению с затратами на приобретение нового крана.

Максимальный срок эксплуатации до следующего обследования назначается в зависимости от фактического режима работы [1]. С 01.01.85 классификация кранов осуществляется по ГОСТ 25546-82 по комби-

© В. И. Дубровин, В. А. Клименко, А. М. Руднев, 2006

нации класса нагружения и класса использования. ГОСТ 25546-82 создан на базе ИСО 4301, утвержденного ТК 96 ИСО в 1980 году, когда обследование кранов еще только начинало принимать массовый характер. Ниже приводятся несовершенства классификации грузоподъемных кранов, отработавших нормативный ресурс:

1. За последние 15 лет появилось несколько нормативов на расчетный срок службы. Кроме того, срок службы приведен в зависимости от группы режима работы, которая подлежит определению.

2. Ввиду отсутствия в Правилах Госгортехнадзора однозначных количественных характеристик режимных групп, точное их сопоставление с режимными группами стандарта ИСО затруднено.

3. При длительных сроках эксплуатации определить число циклов нагружения затруднительно, особенно в последнее десятилетие, когда ритмичность производства часто изменялась.

Учитывая принципы, положенные в основу классификации согласно ГОСТ 25546-82, целесообразно было бы новый параметр выбрать таким, чтобы он обеспечивал эквивалентность с точки зрения усталостной прочности. В качестве параметра для прогнозирования срока следующего обследования предполагается использовать вероятность повреждения. Ранее установлено, что вероятность повреждения зависит от таких факторов, как тип крана, технология его изготовления, условия эксплуатации [1, 3]. До построения математической модели работы мостового крана целесообразно произвести статистический анализ расчетных параметров мостовых кранов на исследуемых предприятиях.

2 Постановка задачи

Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса относится к конкретному находящемуся в эксплуатации техническому объекту. Основой для прогнозирования служит информация, которую условно можно разделить на три части. Во-первых, это данные текущего (оперативного) поиска дефектов в процессе эксплуатации. Контроль может быть непрерывным или дискретным (например, приуроченным к плановым профилактическим мероприятиям). Для поиска дефектов нужны встроенные и внешние приборы, системы для хранения и переработки диагностической информации, алгоритмы и программы для принятия решений. Во-вторых, это данные о нагрузках и других условиях взаимодействия объекта с окружающей средой.

Существующие средства неразрушающего контроля не позволяют обнаружить все повреждения и трещины, которые в дальнейшем могут стать причиной предельных состояний. Имеется достаточно большая вероятность пропуска дефектов из-за несовершенства аппаратуры, небрежности оператора или недоступного расположения дефектов. Таким образом, два источника информации – диагностические данные о состоянии объекта и данные об истории нагружения объекта оказываются тесно связанными и взаимно зависимыми.

Прогнозирование индивидуального ресурса включает целый комплекс задач: оценка текущего технического состояния объекта, прогнозирование развития этого состояния на ближайшее будущее и выдача на основе этого прогноза рекомендаций об оптимальном остаточном сроке эксплуатации (до списания данного объекта или его очередного ремонта). Еще одна задача индивидуального прогнозирования – оценка риска по отношению к опасным аварийным ситуациям, установление предельно допустимых остаточных сроков эксплуатации при наличии возрастающего риска и выдача рекомендации о мерах по повышению безопасности.

3 Метод решения задачи

В качестве основных показателей остаточного ресурса принято рассматривать следующие:

- средний остаточный ресурс $\pi(t)$, определяемый как математическое ожидание остаточного ресурса после наработки τ;

- гамма-процентный остаточный ресурс $\pi_\gamma(\tau)$, определяемый как наработка с некоторого момента времени τ, в течение которого безотказно наработавший объект будет иметь значение условной вероятности безотказной работы уровня γ:

$$\frac{R[\tau+\pi_\gamma(\tau)]}{R(\tau)}=\gamma\,. \qquad (1)$$

Если известна первоначальная функция распределения ресурса исследуемых изделий $F(t)$ (или плотность распределения ресурса $f(t)$), то можно определить выражение для упомянутых выше характеристик остаточного ресурса.

В последнее время всё большее распространение в качестве теоретической модели распределения отказов механических изделий получает диффузионное монотонное распределение (DM-распределение) [2].

Запишем выражения для основных функций DM-распределения, используемых для вычисления характеристик остаточного ресурса.

Плотность DM-распределения:

$$f(t)=\frac{\sqrt{\mu}}{\nu\cdot t\cdot\sqrt{2\cdot\pi\cdot t}}\cdot\exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\cdot\nu^2\cdot\mu\cdot t}\right]. \qquad (2)$$

где μ – параметр масштаба, совпадающий со средним значением распределения; ν – параметр формы, совпадающий с коэффициентом вариации распределения.

Функция DM-распределения:

$$F(t)=DM(t,\mu,\nu)=$$
$$=\Phi\left(\frac{t-\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right)+e^{2\nu^{-2}}\Phi\left(-\frac{t+\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right). \qquad (3)$$

Вероятность безотказной работы:

$$R(t) = 1 - DM(t;\mu,\nu) = \\ = \Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) - e^{2\nu^{-2}}\Phi\left(-\frac{\mu + t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right). \quad (4)$$

Выражение для плотности остаточного ресурса при DM-распределении имеет вид:

$$r(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{\nu t\sqrt{2\pi t}}\exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\nu^2\mu t}\right] \times \\ \times\left[\Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) - e^{2\nu^{-2}}\Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu\sqrt{\mu t}}\right)\right]^{-1}. \quad (5)$$

Выражение для остаточной функции надёжности $R(t|\tau)$ (при $t \geq \tau$) определяется из следующих соотношений:

$$R(t|\tau) = 1 - \int_{\tau}^{t} r(t)dt = 1 - \frac{1}{R(\tau)}\int_{\tau}^{t} f(t)dt = \\ = \frac{R(t)}{R(\tau)} = \frac{\Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) - e^{2\nu^{-2}}\Phi\left(-\frac{\mu + t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right) - e^{2\nu^{-2}}\Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right)}. \quad (6)$$

4 Процедура расчета остаточного ресурса

Статистика выхода из строя крана ведется по 5 факторам:

1. Остаточный прогиб в вертикальной плоскости (f):

- $f \leq 0{,}0022L$ – в пролёте допускается эксплуатация крана при проведении осмотров и нивелировке не реже 1 раза в год;

- $f > 0{,}0035L$ – в пролёте не допускается.

2. Искривление балок и ферм в плане не более $0{,}005L$ – допускается.

3. Скручивание коробчатых и двутавровых балок не более $0{,}002L$ – допускается.

4. Наличие металла с ударной вязкостью меньше 2 кгс·м/см^2 – допускается эксплуатация только при температуре не ниже 0 °С.

5. Коррозия:

- менее 10 % – допускается;

- более 20 – не допускается.

Пример таблицы исходных данных для одного крана приводится ниже.

Экспертные обследования проводились после 12 лет эксплуатации крана с интервалом в 2 года. Далее статистика обрабатывалась по 2 параметрам: достижению какого-либо из контролируемых факторов предельного значения, после которого требуется принимать решение о продолжении эксплуатации крана (Решение), либо по полному прекращению его эксплуатации (Выбраковка).

Таблица 1 – Исходные данные для мостового крана. Грузоподъемность – 50 тонн, пролёт балки – 22,5 м

Срок эксплуатации, г.	Фактор				
	1	2	3	4	5
12	10	28	8	4	3
14	15	34,1	10,6	3,85	4,2
16	19,5	40,1	13,3	3,8	5,45
18	24,6	46,5	16	3,8	6,6
20	30	52,3	18,7	3,6	7,85
22	35,1	58,6	21,2	3,6	9,1
24	40	64,7	23,8	3,6	10,3
26	45,9	70,7	26,4	3,4	11,4
28	51	76,8	29,1	3,3	12,6
30	56	82,9	31,7	3,2	13,8
32	61,8	89,4	34,5	3	15,2
34	66,9	95,1	37	2,9	16,4
36	72,2	101	39,9	2,8	17,6
38	78,3	107	42,3	2,8	18,7
40	84	113	45	2,2	20

Модель диффузионного монотонного распределения была использована для автоматизации расчёта остаточного ресурса мостовых кранов. В результате, были посчитаны статистические параметры диффузионного распределения, построены функции распределения и составлена таблица результатов прогнозирования. В итоге, получаем автоматизированный расчёт ресурса по диффузионному распределению, коэффициент вариации был принят $\nu = 0{,}5$.

Таблица 2 – Результаты прогнозирования

Срок эксплуатации, г.	Количество кранов	
	Решение	Выбраковка
12	12	0
14	3	0
16	0	0
18	0	1
20	0	2
22	7	3
24	22	5
26	6	2
28	0	1
30	0	0
32	0	1
34	0	0
36	0	4
38	0	8
40	0	23

Список литературы

1. Вершинский А.В., Ряднова Л.В. Оптимальные конструкции в краностроении: Обзор. – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ. – 1989. – 44 с.
2. Стрельников В.П. Прогнозирование остаточного ресурса изделий электронной техники // Математичні машини і системи. – 2000 – № 2, 3. – С. 163-169.
3. Котельников В.С. и др. Магнитная диагностика и контроль остаточного ресурса металлоконструкций подъемных сооружений. // Подъемные сооружения. Специальная техника – №7. – 2002. – С. 25-27.

Одержано 10.10.2006

Розглянуто розв'язання задачі прогнозування залишкового ресурсу вантажопідйомних кранів. За теоретичну модель розподілу відмов запропоновано використати дифузійний монотонний розподіл. У результаті проведеного аналізу статистичних даних побудовано математичну модель для оцінки залишкового ресурсу.

The solving of the problem of residual resources prognosis for loading cranes was shown. As theoretical model of refuses distribution the diffusion monotonous one was offered to use. As a result of statistic data analysis the mathematical model for residual resources estimation was proposed.

УДК 669.018.256: 620.22

Канд. техн. наук С. Н. Попов, Д. А. Антонюк

Национальный технический университет, г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ ТРИБОМАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ РЕЗЦОВ ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ В УСЛОВИЯХ ИЗНАШИВАНИЯ ЗАКРЕПЛЕННЫМ АБРАЗИВОМ

В работе рассмотрены вопросы разрушения рабочих органов дорожно-строительной техники, эксплуатирующиеся в условиях абразивного изнашивания закрепленным абразивом. Проведены аналитические исследования влияния трибоматериаловедческих параметров резцов на интенсивность их износа. На основании решения уравнений динамики движения резца в вязко-упругой среде оптимизирована его геометрическая форма. Получены математические зависимости влияния геометрических размеров резца на величину давления и интенсивность износа инструмента.

Введение

Эксплуатация рабочих органов дорожно-строительной, горнодобывающей, почвообрабатывающей техники в условиях абразивного изнашивания закрепленным абразивом с наличием больших скоростей резания твердых пород и покрытий приводит к интенсивному износу режущих частей инструментов. Недостаточный срок службы резцов, лопаток, зубьев и рыхлителей вызывает необходимость постоянной замены режущих элементов, что обусловливает большие материальные затраты и вызывает неплановые ремонты, связанные с установкой новых деталей. При строительстве и ремонте асфальтобетонных дорожных покрытий (удаление и измельчение слоя деформированного асфальта) применяют дорожные фрезы. Режущим инструментом в дорожных фрезах является лопатка (отечественные фрезы) или резец (зарубежные фрезы и отечественные после 1993 г. производства). В настоящее время применяются резцы производства фирм "Betek", "Sandvik" и "Caterpillar", состоящие из корпуса (державки), твердосплавного наконечника, защитного кольца и прижимной втулки.

Анализ литературных данных

Современные научные и промышленные разработки содержат обширный массив данных, однако не позволяют определить оптимальное соотношение трибоматериаловедческих параметров резцов (форма, материал резца и режимы фрезерования). Это связано с тем, что априорные данные содержат информацию об исследованиях, которые касаются изучения только одного из показателей либо материаловедческих параметров сплава, либо условий изнашивания (температура, скорость относительного перемещения, давление изнашивающей среды).

Так, например, в работе [1] предлагается упрочнять лопатку дорожной фрезы Д-530 однопроходной автоматической наплавкой порошковой лентой ПЛ-У40Х38Г2 (4,25 % C; 38,5 % Cr; 2,2 % Mn; 0,20 % Si) под флюсом АН-28. Микроструктура наплавленного

© С. Н. Попов, Д. А. Антонюк, 2006

металла которого состоит из большого количества карбидов хрома и эвтектики, представляющей смесь мелких карбидов и твердого железохромового раствора. Микротвердость карбидов составляла 13,5-14,9 ГПа, твердого раствора – 4,3-6,3 ГПа. Испытания показали, что износостойкость лопаток, наплавленных данным материалом в 4,5 раза выше, чем износостойкость лопаток, наплавленных электродами ЦН-11 (2,4 % С; 11,0 % Cr; 11,0 % Mn; твердость – 41 HRC; структура состоит из карбидной эвтектики и остаточного аустенита с ледебуритом) и в 1,5 раза – сплавами КБХ (2,5 % С; 25,0 % Cr; 1,0 %В; 0,5 % Mn; твердость – 58 HRC с микроструктурой из 50-70 % крупных (50-65 мкм) ромбовидных и иглообразных карбидов, расположенных в ледебурите). Однако, значительное количество твердой фазы больших размеров вызывает существенное снижение эксплуатационной надежности, вследствие высокой хрупкости сплава. Поэтому применение данной группы материалов для эксплуатации в условиях резцов дорожной фрезы практически нецелесообразно.

Анализ внешних условий эксплуатации рабочих органов земснарядов (фрезерные рыхлители с зубьями, ножи и черпаки) указывает на частичное сходство с дорожными фрезами: интенсивное абразивное изнашивание с наличием локальных ударных нагрузок; скорости относительного перемещения абразива ($V_{дор.фрез.}$ = 12-22 м/мин; $V_{зем.снар.}$ = 14,5 м/мин); твердости абразивных частиц (H_{50} [SiO_2]= 13,5-16,0 ГПа, H_{50} [Гранита] = 13,9 – 16,8 ГПа). В тоже время, расхождение в пределах прочности частиц на сжатие (σ_B [SiO_2] = 4,8 ГПа, σ_B [Гранита] = 10-30 ГПа), степени закрепленности абразива и наличие гидроабразивной среды обусловливает необходимость уточнения механизма изнашивания рабочей поверхности резца фрезы. Авторы [2] предлагают использовать опытные электроды типа ЭН-130Х10Н2ФБ (45-53 HRC), с доэвтектической микроструктурой аустенита и сеткой карбидной эвтектики. Для упрочнения деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания в воде (зубья, фрезы, черпаки земснарядов), разработан сплав типа 140Х10С2Г2БНФ [3]. Комплексное легирование редкими дорогостоящими добавками – Nb, V и Ni – хромоуглеродистого сплава позволяет получить основу сплава, состоящую из аустенита, который в процессе эксплуатации претерпевает неполное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение. При этом часть энергии разрушения, затрачиваемой на изнашивание, расходуется на процесс фазового превращения, что приводит к общему повышению износостойкости. Однако, следует отметить, что использование данного материала, даже при образовании мартенсита деформации ($H_{м.д.}$ = 8,0-11,0 ГПа) в условиях работы резцов дорожных фрез не обеспечит значительного увеличения износостойкости, поскольку микротвердость материала уступает твердости абразивной среды ($H_a \geq$12-16 ГПа), а коэффициент $H_a/H_м$ составляет порядка 1,1-2,0.

В результате испытаний [2] при резании со скоростью 14,5 м/мин, путь резания 50 м, толщина срезаемого слоя 0,6 мм, установлено, что наибольшей износостойкостью при “сухом” трении обладает наплавленный металл типа 350Х15Г3Р1 и 320Х23С2ГТР со структурой, состоящей из избыточных карбидов и ледебурита, в состав которого входят и карбобориды. Большое содержание углерода (3,2-3,5 %) и ледебуритная матрица обусловливает хрупкость наплавленного слоя и невозможность удержания карбидов и карбоборидов. При резании под водой, особенно при значительных локальных нагрузках, по данным работы [2] рекомендован сплав с доэвтектической структурой, состоящей из аустенитной матрицы и карбидной эвтектики типа 130Х10Н2ФБ (ε = 3,9), а самую низкую – 100Х6Г6С3РАФ (электроды ОЗН-7, ε = 1,3, заэвтектическая структура).

Многообразие конструкций резцов и модификаций дорожных фрез, разработанных для работы в различных режимах резания (скорость, величина подачи, угол атаки и др.), а также наличие большого количества стандартных износостойких сплавов не позволяет однозначно определить их оптимальное сочетание.

Анализ формы и конструкции резцов показал, что до настоящего момента применяются режущие ножи Т-образной формы, закрепляемые клиновым способом, с помощью закладных планок и болтов. Фирма “Wirtgen” предложила конусообразную форму режущего инструмента. Данные [4] о влиянии геометрии режущего инструмента (рис. 1) на интенсивность его износа показывают, что при обработке фельзитового туфа (содержащего не менее 67,78 % SiO_2; 13,27 % Al_2O_3; $\sigma_{сж}$ = 2-8 ГПа) и базальта (51,0 % SiO_2; 16,5 % Al_2O_3; 12,0 % Fe_2O_3; 9,0 % MgO; $\sigma_{сж}$ = 5-18 ГПа), с увеличением заднего угла α (рис. 1) интенсивность износа инструмента по высоте фаски существенно уменьшается.

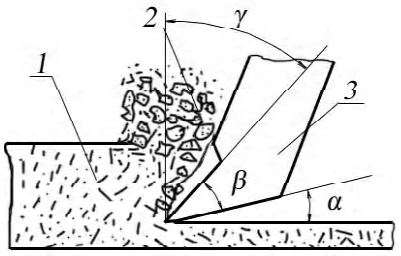


Рис. 1. Схема взаимодействия режущего инструмента с каменной породой: 1 – порода; 2 – отделившиеся абразивные частицы; 3 – режущий инструмент; α – главный задний угол; β – передний угол; γ – угол заострения резца

Увеличение заднего угла α (с 5 ° до 20 °) при значении переднего угла β в пределах 10-20 ° приводит к уменьшению угла заострения режущей кромки γ. Износ резцов с увеличением заднего угла α до значения 9 ° уменьшается. Дальнейшее увеличение заднего угла α свыше значения (9-13°), при постоянном значении переднего угла, приводит к ослаблению режущей кромки, и износ по весовому признаку растет [4]. Это объяс-

няется ростом нагрузки на более тонкую рабочую кромку, а также влиянием высокой температуры трения. Таким образом, применение резцов формы рис. 1 нецелесообразно, поскольку в результате износа передней грани наконечника дальнейшее его применение невозможно. Решение задачи поиска оптимальной геометрии резца необходимо за счет геометрической формы режущего инструмента таким образом, чтобы давление изнашивающей среды распространялось равномерно по всей поверхности резца, что обеспечит равномерный износ всей поверхности и увеличит срок службы инструмента.

Авторы [5] исследовали влияние режимов резания и количества резцов основных типов исполнительных органов камнерезных и камнеобрабатывающих машин и станков. Анализ зависимостей мощности распиловки от скорости резания $\overline{V}_{рез.}$ свидетельствует о наличии оптимальной скорости резания для каждого значения подачи, определяемой минимумом мощности и величины износа инструмента. В существующем диапазоне подач (от 0,5 до 0,7 м/мин) оптимальные скорости распиловки находятся в пределах от 2,9 м/с (45 об/мин) до 3,9 м/с (60 об/мин). Однако приведенные в работе [5] результаты исследований не позволяют получить корреляционную связь со структурно-фазовым состоянием сплава и его физико-механическими характеристиками, что не позволяет определить основные трибоматериаловедческие критерии оценки износостойкости.

А.К. Рейш [6] изучал скорость изнашивания зубьев рыхлителей из стали 110Г13Л, подвергающиеся интенсивному абразивному изнашиванию в процессе разработки скальных грунтов, в зависимости от скорости движения зуба. В результате исследований было определено, что с увеличением скорости движения повышается скорость изнашивания. Для рабочих органов дорожных фрез автор также доказал, что с повышением его скорости движения увеличивается скорость изнашивания зуба, причем это увеличение для разных сталей различно. Так для сталей с временным сопротивлением разрыву $\sigma_в$ = 150 МПа при повышении скорости движения в 2 раза скорость изнашивания зуба увеличивается на 12,5 %, а для сталей с временным сопротивлением разрыву $\sigma_в$ = 300 МПа – на 34 %. Однако, автором не было учтено влияние структурно-фазового состояния металла, давление и температуры изнашивающей среды, а также показателей абразивной среды на интенсивность изнашивания режущего инструмента. Также в ходе исследований не учитывалось влияние формы рабочего органа, что не позволяет применить полученные данные для выбора оптимальных параметров при эксплуатации резцов дорожной фрезы. Кроме того, физико-механические показатели временного сопротивления разрыву $\sigma_в$ без учета соотношения $H_а/H_м$ не могут в полной мере отразить истинные свойства материала к сопротивлению абразивному разрушению.

Р.В. Акопов [7] установил оптимальную скорость резания артикского туфа ($\sigma_{сж}$ = 12…14 МПа) резцами из твердого материала ВК8, которая составила в пределах 4,17-4,5 м/с. С.С. Левин рекомендовал для обработки материалов из ячеистых бетонов инструментом ВК8 оптимальную скорость фрезерования 12,0…15,3 м/с [8]. Полученные в работах [6-8] данные показывают противоречивость результатов о влиянии скорости относительного перемещения на интенсивность изнашивания рабочих органов, что можно объяснить отсутствием учета других не менее важных параметров изнашивания – давления и температуры абразивной среды.

Таким образом, разрозненность и противоречивость данных относительно влияния режимов контактного взаимодействия, а также структуры и свойств твердых сплавов рабочих органов дорожно-строительной техники на интенсивность изнашивания не позволяет определить оптимальное сочетание формы и материала резца для работы в конкретных условиях эксплуатации (физико-механические свойства абразива, скорость относительного перемещения, давление изнашивающей среды, температура).

Следует также отметить, что резцы, изготовленные в Германии, Англии, Швеции, Голландии предусмотрены для эксплуатации на высококачественных дорожных покрытиях в условиях строгой технологической и эксплуатационной дисциплины. Условия работы отечественного оборудования не всегда обеспечивают строгое выполнение границ технологических режимов, что обуславливает значительное расхождения в интенсивности и характере изнашивания. Таким образом, необходимо обозначить основные факторы, определяющие ресурс работы режущего инструмента:

1. Геометрия резца: форма, размеры наконечника и корпуса. Влияние динамических нагрузок. Энергетическое воздействие ударного контактирования.

2. Физико-механические свойства, химический состав и структурно-фазовое состояние твердосплавного наконечника и корпуса резца.

3. Режимы резания: скорость (V), глубина подачи (S), угол атаки (α) и др.

Каждый из этих аспектов имеет важное значение, однако для наиболее эффективного решения поставленной задачи необходимо рассматривать проблему в общей системе влияния материаловедческих, технологических и эксплуатационных характеристик на износостойкость детали.

Цель исследований – определить взаимное влияние геометрических показателей и формы резца, а также химического состава и физико-механических свойств материала и условий эксплуатации на интенсивность изнашивания и работоспособность резцов дорожной фрезы.

Для достижения цели предлагается решить следующие задачи:

- определить оптимальную форму резца;

- исследовать эпюры скоростей, давлений и износа на поверхности резца при взаимодействии конической поверхности с абразивным материалом;

- определить интенсивность износа резца.

Методика проведения исследований

Промышленные исследования проводились на предприятиях ЭЛУАД и Облавтодор г. Запорожья. Наблюдения и измерение размеров рабочих органов осуществлялось на дорожной фрезе Wirtgen W500, применяющихся для снятия слоя деформированного асфальтобетонного покрытия, толщина удаляемого слоя составляла 100 мм. Изучавшиеся резцы фирмы Wirtgen – W6 №128302 представляют собой: наконечник из твердого сплава ВК-8 и корпус (державку) из конструкционной углеродистой стали 35Г2. Измерения линейного износа (ΔL) резцов осуществляли непосредственно без их снятия в момент остановки дорожного агрегата с помощью шаблона и микрометра гладкого (МК) по высоте (H) резца с точностью ±0,25 мм. В процессе исследований использованы методы математического моделирования и статистической обработки экспериментальных данных [9].

Результаты исследований

Движение рабочего органа дорожной фрезы представляет собой движение твердого тела по монолитному абразиву, при этом отделившиеся частицы как металла, так и гранита также участвуют в процессе изнашивания. Минимальный износ режущего инструмента будет наблюдаться в том случае, когда нагрузка распространяется на поверхность режущей части большей площади. Поэтому необходимо определить оптимальную форму резца с точки зрения снижения нагрузки при движении в слое асфальтобетона. Процесс резания асфальтобетонного покрытия (без учета динамического воздействия) отражает формула, полученная из "клиновой" схемы резания [10]:

$$N = \frac{k_{УД}\, bh \cos\varphi_T \cos\varphi_{BH}}{\cos^2\left(\dfrac{\alpha + \varphi_T + \varphi_{BH}}{2}\right)}, \qquad (1)$$

где $k_{уд}$ – удельное сопротивление асфальта сдвигу;

b, h – ширина и толщина (глубина фрезерования) среза;

φ_{BH} – угол внутреннего трения асфальта;

α – угол фрезерования;

φ_T – угол трения асфальта по клину.

Но выражение (1), позволяет определить приведенный коэффициент вязкого сопротивления среды и выбрать наиболее оптимальную форму режущего органа только для постоянной скорости резания. Однако, учитывая такие особенности процесса фрезерования, как периодичность работы резцов фрезы, переменная площадь поперечного сечения стружки, а также непостоянное число резцов, одновременно находящихся в работе, обусловливает переменные значение сил, моментов и давления, определяющих стружкообразование и, следовательно, имеет нестационарный характер [10].

Таким образом, для анализа условий эксплуатации необходимо рассмотреть вращательное движение резца дорожной фрезы в абразивной среде. На плоское сечение сектора резца дорожной фрезы, движущегося по круговой траектории с угловой скоростью ω вокруг центра O (рис. 2), действуют силы нормального давления и трения:

$$P_П = \eta\upsilon\cos\mu; \qquad \tau = P_П f = \pi\upsilon\cos\mu, \qquad (2)$$

где μ – угол между касательной к профилю и радиус-вектором рассматриваемой точки.

Полный момент сопротивления для плоского сечения сектора:

$$M = \eta\omega\int_0^{\vartheta}\rho^2\left(\cos^2\mu + f\sin\mu\cos\mu\right)\sqrt{\rho^2 + \left(\rho'\right)^2}\,d\vartheta, \qquad (3)$$

где θ – полярный угол.

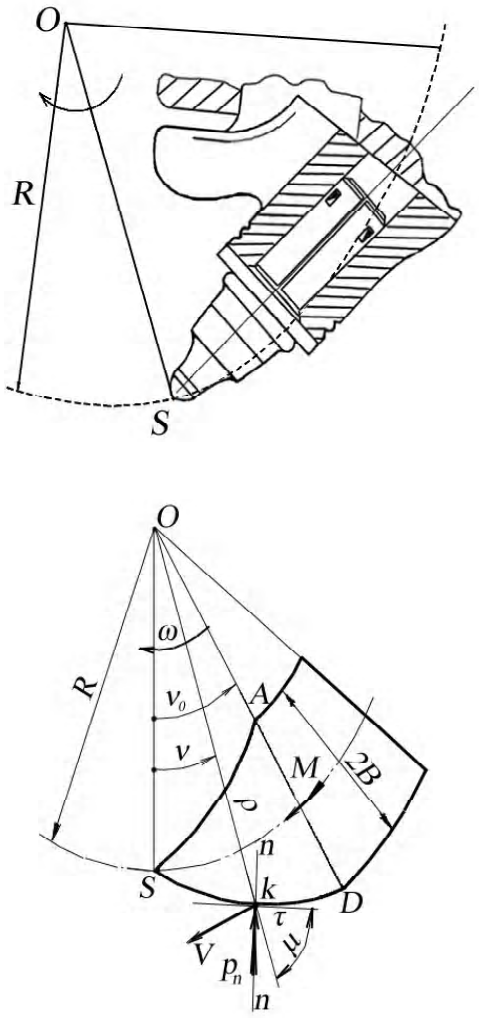


Рис. 2. Схема сил, действующих на резец, движущийся по круговой траектории в вязкоупругой среде

Производя замену $\sin\mu = \dfrac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + (\rho')^2}}$;

$\cos\mu = \dfrac{\rho'}{\sqrt{\rho^2 + (\rho')^2}}$ и вводя параметр $t = tg\mu = \rho / \rho'$, получим:

$$p = C_1 \frac{\sqrt{t^2+1}}{\sqrt[3]{t-f}}; \qquad (4)$$

$$\theta = \frac{2}{3}t - \operatorname{arctg} t - \frac{f}{3}\ln|t-f| + C_2 . \qquad (5)$$

Выражения (4) и (5) дают в параметрической форме спираль с центром в точке O. Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определим из условий ($p(O)=R$; $p(\theta_o) = R \pm B$), определяющих границы сопряжения рабочего инструмента с абразивной средой. В результате интегрирования, получаем спираль, раскручивающуюся в обратную сторону. Пересечения правой и левой спиралей образуют форму оптимального рабочего органа, движущегося по дуге радиуса R в моделируемой среде. Для $C_1 = 1$ и $C_2 = 0$ эта форма показана на рис. 3.

Следовательно, оптимальной формой резца с учетом минимальной нагрузки абразива на поверхность трения при движении в слое асфальтобетона обеспечивает конусообразная траектория относительного перемещения частицы по рабочей кромке.

Рассмотрим эпюры давлений и износа при взаимодействии контактирующих поверхностей резца и монолитного абразива (рис. 4, табл. 1). Допустим, что все точки, расположенные на одной траектории, имеют одинаковые условия изнашивания, а также во время взаимодействия вся конусообразная поверхность соприкасается с абразивом. В соответствии с [11] учитывая линейный закон изнашивания $\gamma = Kp_aV$, скорости изнашиваемых сопряженных поверхностей определим из выражений:

$$\gamma_1 = K_1 p_a 2\pi n y \cos\alpha ; \qquad (6)$$

$$\gamma_2 = K_2 p_a 2\pi n y \cos\alpha , \qquad (7)$$

где γ_1, γ_2 – скорости изнашивания соответственно корпуса резца и абразивной смеси, мм/мин;

K_1, K_2 – коэффициенты трения;

p_a – давление изнашивающей среды на поверхности трения, кПа;

y – координата длины боковой поверхности резца, мм;

α – угол между боковой поверхностью и горизонталью резца.

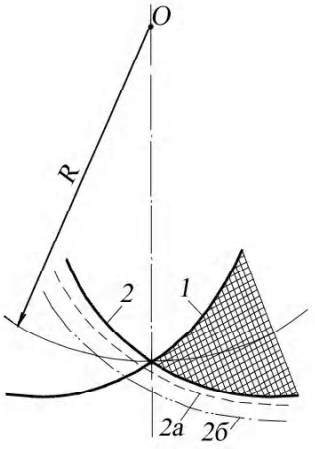


Рис. 3. Оптимальный профиль тела для движения по круговой траектории в вязкоупругой среде: 1 – левая спираль; 2 – правя спираль, f = 0; 2а – f = 0,2; 2б – f = 0,3

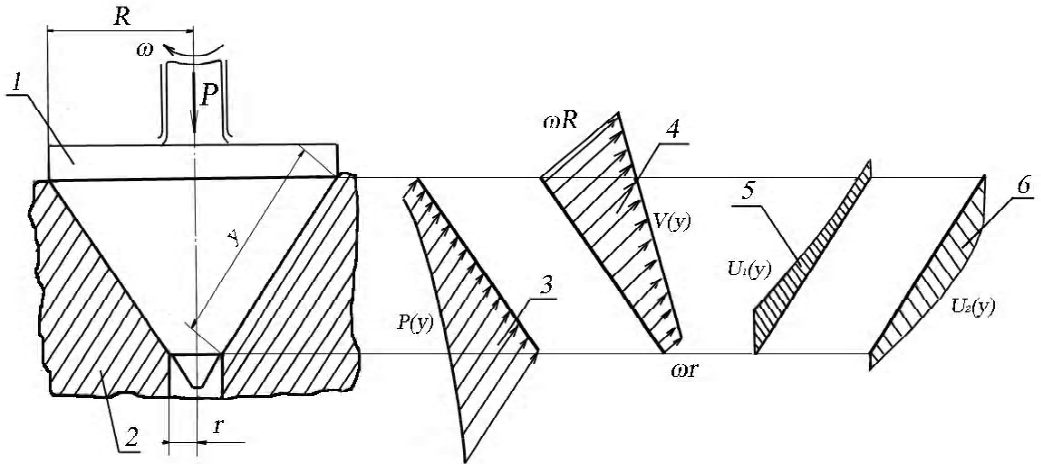


Рис. 4. Эпюры давлений, скоростей и износа при взаимодействии конической поверхности резца с абразивным материалом: 1 – конусообразная поверхность корпуса резца; 2 – абразивный материал; 3 – эпюра давлений $P(y)$; 4 – эпюра скоростей на поверхности корпуса $V(y)$; 5 – эпюра износа резца $U_1(y)$; 6 – эпюра износа абразивного материала $U_2(y)$

Таблица 1 – Влияние координат точек (y) на боковой поверхности резца на параметры изнашивания

y, мм	Давление на поверхности резца p_a, кПа	Скорость относительного перемещения точки на поверхности резца, м/мин	Линейный износ корпуса резца, мм
0,011	–	19,47	7,50
0,015	114,15	19,18	6,95
0,020	84,14	18,89	2,45
0,025	68,27	18,6	0,25
0,030	55,68	18,35	0
0,042	40,19	17,91	0

Примечание: параметры расчитывались для постоянных условий:
- усилие прижатия (величина подачи) на один резец – 9,27 Н;
- максимальный радиус корпус арезца R = 17 мм;
- радиус наконечника r = 12 мм;
- частота вращения резца в резцедержателе n = 30 об/мин.

С учетом того, что сумма износов резца и асфальтобетона, измеренная в направлении сопряженных поверхностей, должна быть постоянной и равняться износу всего сопряжения [11], тогда

$$p_a = \frac{\gamma_{1-2}}{2\pi n(K_1 + K_2)} \frac{1}{y}, \qquad (8)$$

где n – частота вращения резца, об/мин.

Из равенства (8) следует, что эпюра давлений имеет нелинейный квадратичный характер, так как для заданных режимов работы $\gamma_{1\text{-}2}$= const (рис. 4, а). Эпюра скоростей точек, расположенных на поверхности корпуса резца, с учетом зависимости между линейной и угловой скоростями ($V = \omega R$), представлена на рис. 4, б. Для определения значений $\gamma_{1\text{-}2}$ найдем зависимость между силой P и давлением p_a, распределенным по поверхности трения

$$P = 2\pi \int_{y_1}^{y} p_a \cos\alpha \rho dy = 2\pi \cos^2 \alpha \int_{y_1}^{y_2} p_a y dy, \qquad (9)$$

где $\rho = y\cos\alpha$; $y_1 = \frac{r}{\cos\alpha}$; $y_2 = \frac{R}{\cos\alpha}$. Подставляя выражение p_a и решая уравнение относительно $\gamma_{1\text{-}2}$, получаем

$$\gamma_{1-2} = \frac{Pn(K_1 + K_2)}{(R-r)\cos\alpha}. \qquad (10)$$

Тогда

$$p_a = \frac{P}{2\pi(R-r)\cos\alpha} \frac{1}{y}. \qquad (11)$$

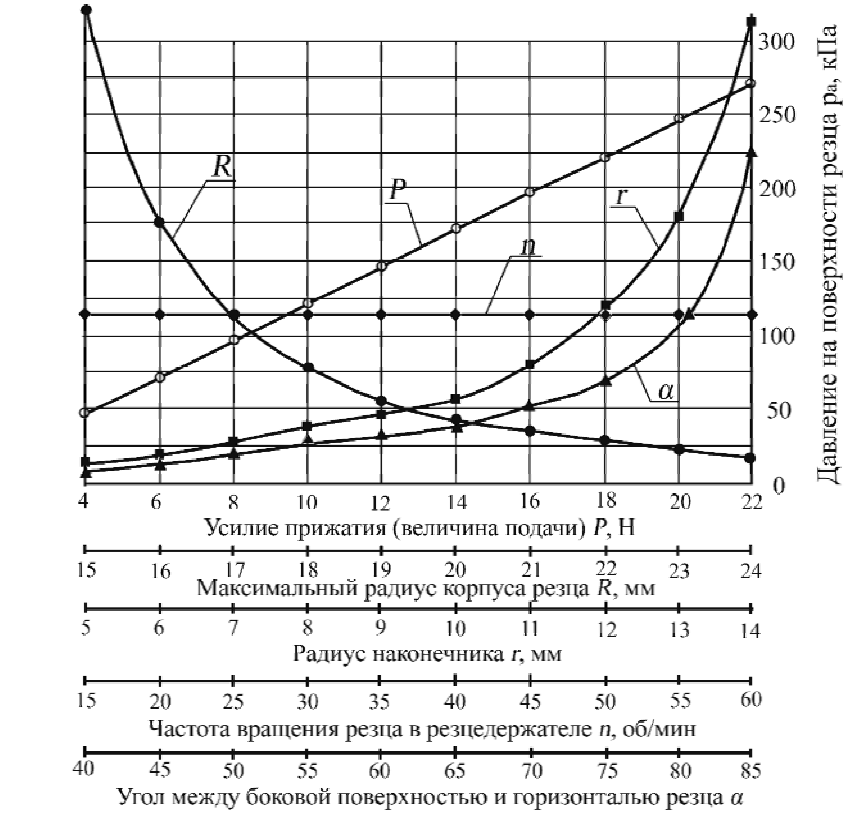
Величину износа поверхности резца и монолитного абразива получаем из выражений γ_1 и γ_2 после подстановки в них значения p_a

$$U_1 = \gamma_1 t = K_1 \frac{Pn}{R-r} t; \qquad (12)$$

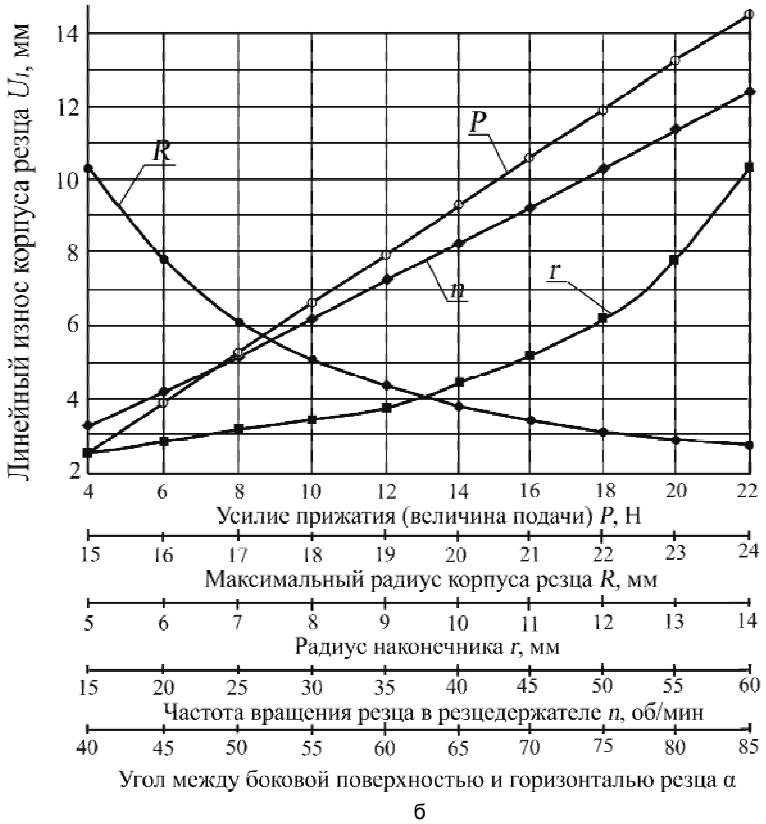
$$U_2 = \gamma_2 t = K_2 \frac{Pn}{R-r} t, \qquad (13)$$

где t – время изнашивания, мин.

Анализ взаимодействия контактирующих поверхностей показывает, что инструмент (резец) в большей степени изнашивается в зоне сужения (1, рис. 4), а контактирующий материал в средней зоне взаимодействия (2, рис. 4). Полученные уравнения (11)-(13) отображают влияние геометрических размеров резца на интенсивность износа инструмента. Графические зависимости (рис. 5), иллюстрирующие математические выражения (11)-(13), построенные для центральной части корпуса резца в районе наконечника, показывают, что с увеличением усилия прижатия P (величины подачи) прямо пропорционально растет величина нагрузки (рис. 5, а) на поверхности корпуса резца (p_a) и его износ (рис. 5, б) (U_1). Увеличение радиуса наконечника негативно сказывается на работоспособности рабочего инструмента дорожной фрезы: давление на поверхности и износ корпуса резца увеличивается по параболической зависимости (рис. 5, а; б). Иначе влияет рост максимального радиуса резца (R, рис. 4). Наблюдается снижение давления на поверхности корпуса резца и величина его износа (рис. 5, а; б). При этом характер кривой также параболический. Повышение частоты вращения резца в резцедержателе, которое может быть вызвано наличием дополнительных канавок, улучшающих вращающую способность, приводит к увеличению нагрузки. Рост угла α (рис. 4), в котором отражена длина резца, также приводит к повышению нагрузки, возникающей на поверхности корпуса резца (рис. 5).



а



б

○ – усилие прижатия (величина подачи резца) *P*, Н; ● – максимальный радиус корпуса резца *R*, мм; ■ – радиус наконечника *r*, мм; ◆ – частота вращения резца в резцедержателе *n*, об/мин; ▲ – угол между боковой поверхностью и горизонталью резца α

Рис. 5. Влияние геометрических характеристик резца на: а – величину нагружений (P_a); б – износа (U_1) центральной части резца

Выводы

1. Разрозненность и противоречивость данных относительно влияния режимов контактного взаимодействия, а также структуры и свойств твердых сплавов рабочих органов дорожно-строительной техники на интенсивность изнашивания не позволяет определить оптимальное сочетание формы и материала резца для работы в конкретных условиях эксплуатации. Для получения оптимальных показателей работоспособности предложено комплексное исследование эксплуатационных показателей (геометрические характеристики резца, режимы изнашивания, структурно-фазовое состояние материала) в единой трибосистеме.

2. На основании решения уравнений динамики движения резца в вязко-упругой среде оптимизирована геометрическая форма резца. Установлено, что минимальное давление на поверхности рабочего органа дорожной фрезы достигается при использовании конусообразной формы.

3. На основе построенных эпюр [$P = f(y)$, $V = f(y)$, $U_1 = f(y)$, $U_2 = f(y)$], доказано, что инструмент (резец) в результате взаимодействия контактирующих поверхностей в большей степени изнашивается в зоне сужения, а контактирующий материал в средней зоне. Полученные математические функции и их графические зависимости отображают влияние геометрических размеров резца на величину давления на поверхности резца и интенсивность износа инструмента.

Список литературы

1. Кортелев Г.А., Харитонов В.Н. Износостойкая наплавка лопаток дорожной фрезы Д-530 // Сварочное производство. – 1964. – №11. – С. 37-38.
2. Калинин Л.Н., Гринберг Н.А., Густов Ю.И. Повышение долговечности рабочих органов земснарядов износостойкой наплавкой // Износостойкость деталей дорожно-строительной техники. – М.: Наука, 1987. – С. 89-91.
3. Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г., Калинин Л.Н. и др. Износостойкость различных наплавочных сплавов, эксплуатируемых в условиях абразивного изнашивания в воде // Сварочное производство. – 1990. – №4. – С. 39-41.
4. Акопов Р.В. Геометрия режущего инструмента при резании камня. – М.: Машиностроение, 1982. – 252 с.
5. Лейкин М.Г., Гуменников Н.Е. Оптимизация режимов и количества резцов камнерезных машин // Строительные материалы. – 1971. – №1. – С. 18-19.
6. Рейш А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
7. Акопов Р.В. К вопросу о режущих способностях инструментальных материалов при обработке камня. – Изв. Акад.наук Арм. ССР. – 1952, том V, №4, С. 77-81.
8. Левин С.С. Отделка поверхностей изделий из ячеистых бетонов фрезерованием. – М.: Гос. изд. литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. – 24 с.
9. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
10. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. – Л.: Машиностроение, 1990. – 197 с.
11. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т.1 Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

Одержано 6.10.2006

В роботі розглянуті питання руйнування робочих органів дорожньо-будівельної техніки, які працюють в умовах абразивного зношування закріпленим абразивом. Проведені аналітичні дослідження впливу трібоматеріалознавчих параметрів різців на інтенсивність їх зношування. На основі розв'язання рівнянь динаміки руху різця у в'язко-пружному середовищі оптимізовано його геометричну форму. Отримані математичні залежності впливу геометричних розмірів різця на величину тиску та інтенсивність зносу інструменту.

The questions of working parts of road - building technics damage used in abrasive wearing conditions with fixed abrasive were studied. The analytical investigations of influence of tribomaterialscience parameters of cutters on their wear intensity were carried out. On the basis of cutter movement dynamics equation solving for viscous elastic conditions, it's geometrical form was optimized. The mathematical dependencies of cutter geometrical dimensions influence over pressure value and tool wear intensity were received.

УДК 676.163.022;62-932

Д-р техн. наук Г. И. Нечаев[1], д-р техн. наук Г. И. Камель[2], А. Г. Яковлева[2]

[1] Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск,
[2] Национальный технический университет, г. Запорожье

КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОЙ ВАРКИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

В данной статье приведена концепция повышения технико-экономической эффективности транспортно-загрузочной системы за счет оптимизации функциональных, эксплуатационных, конструктивных и технологических параметров.

Введение

Транспортно – загрузочная система (ТЗС) относится к нетрадиционному виду транспорта. Она работает в экстремальных условиях: 1) непрерывна, в течении года, загрузка варочного котла древесной щепой с помощью щёлочи с температурой 160-180 °С; 2) подача щепы в верхнюю часть варочного котла на высоту 60-80 м; 3) гидросмесь в котле находится под давлением 1,2 МПа %;

Из-за внеплановых остановок механического оборудования ТЗС имеют место простои варочного котла и снижение количества целлюлозы, а, следовательно, и бумаги. Основой ТЗС являются конические роторные питатели низкого и высокого давления. На их долю приходится 85 % всех неплановых остановок механического оборудования.

Цель работы

Разработка концепции повышения технико-экономической эффективности ТЗС загрузки варочного котла древесной щепой, за счёт оптимизации функциональных, эксплуатационных, технологических параметров и конструктивных усовершенствований конических трибоузлов ТЗС.

Материалы и результаты исследований

Разработка концепции и методологии повышения технико-экономической эффективности ТЗС непрерывной варки целлюлозы приведена на рис. 1, и состоит из семи блоков, связанных между собой последовательными и параллельными связями.

1. Разработка структурно-алгоритмической схемы и математической модели ТЗС. На базе процессов механики, электромеханики и электротехники разработаны и определены динамические модели всех звеньев (ленточный конвейер, бункер, питатели низкого и высокого давлений, пропарочная камера, питательная труба, загрузочное устройство варочного котла) ТЗС. Математические модели всех звеньев приводили к единой математической модели и структурно-алгоритмической схеме путём исключения промежуточных переменных с использованием математического аппарата операционного исчисления в форме преобразований Лапласа [1]

$$W(p) = W_1(p)\cdot W_2(p)\cdot W_3(p)\cdot W_4(p)\cdot W_5(p)\times \times \frac{W_8(p)}{1+W_8(p)\cdot W_6(p)\cdot W_7(p)}\times \times \frac{W_{11}(p)}{1+W_{11}(p)\cdot W_9(p)\cdot W_{10}(p)}\cdot W_{12}(p), \quad (1)$$

где $P = d/dt$ – оператор Лапласа; T – постоянная переменная; K – коэффициенты передачи.

На основании математической модели (1) и структурно-алгоритмической схемы [1] установлено: 1) две вспомогательные отрицательные связи циркуляции щёлочи низкого и высокого давлений, с помощью которых выполняется загрузка щепы в карманы вращающегося ротора при низком и высоком давлениях; 2) главной отрицательной связи – влияния частоты вращения ротора дозатора щепы на динамику процессора загрузки варочного котла щепой.

2. Определение и оптимизация функциональных параметров ТЗС. Все технологические операции выполняются трубопроводным гидротранспортом, с помощью роторных питателей высокого давления (ПВД). Роторы ПВД выполняют следующие функции: 1) полную автоматизацию всех процессов загрузки трубопроводной транспортной системы; 2) циркуляцию щёлочи низкого (0,15 МПа) и высокого (1,2 МПа) давлений; 3) загрузку щепой карманов, вращающегося ротора ПВД в вертикальной плоскости; 4) выгрузку щепы из карманов ротора ПВД в горизонтальной плоскости; 5) загрузку щепой циркулирующей щёлочью высокого давления верхнии части варочного котла; 6) формирование гидросмеси из двух потоков щепы и

© Г. И. Нечаев, Г. И. Камель, А. Г. Яковлева, 2006

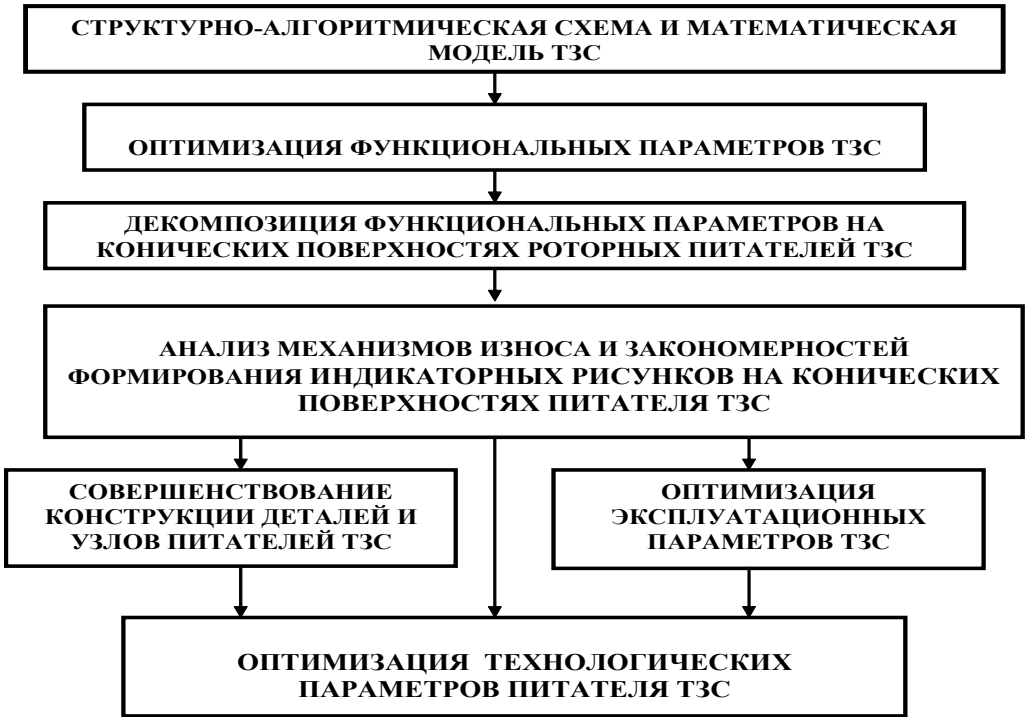


Рис. 1. Структурная схема концепции повышения технико-экономической эффективности гидравлической ТЗС

щёлочи в питательной трубе; 7) выравнивание концентрации щепы в питательной трубе; 8) обеспечивает постоянную скорость и расход щёлочи, щепы и гидросмеси в линиях циркуляции щёлочи низкого и высокого давления; 9) постоянную суммарную площадь окон загрузки (25 %) и выгрузки (15 %) ПВД достигающую 40 % общей конической площади сопряжения; 10) запорного устройства, обеспечивающее автономную работу двух секций ротора и корпуса ПВД и отделяющие область варочного котла (1,2 МПа) от области загрузки – низкого давления (0,15 МПа). На выполнение функции запорного устройства приходится 50 % всех конических поверхностей, из которых 10 % используется для формирования гидроударов – процесс резкого возрастания давления в кармане ротора; 10) протечки щёлочи через подвижные зазоры между вращающимся ротором и корпусом; 11) режущего механизма – срезание щепы попавших в зазор между кромками ротора и задней стенкой сит корпуса.

3. Декомпозиция функциональных параметров на конических поверхностях роторных питателей ТЗС. В настоящее время согласно работе Костецкого [2] в современных автоматизированных технологических процессах ТЗС фирмы Камюр, Пандия и Бауэр широко используются конические трибосистемы. В процессе эксплуатации они обеспечивают: 1) равномерный износ сопрягаемых конических деталей, из которых одна вращается – ротор, а вторая деталь неподвижна – корпус; 2) постоянную компенсацию зазора, между ротором и корпусом, образующегося в результате износа. Однако в литературных источниках отсутствует информация [2] – какие функции выполняет в процессе эксплуатации конические трибосистемы в частности на роторных питателях высокого давления.

Целью работы является выяснение как используются рабочие конические поверхности ротора и корпуса и какие функциональные параметры выполняются на их поверхностях.

С этой целью впервые была разработана декомпозиция функциональных параметров на конических поверхностях трибосистемы. Условно все конические поверхности были разделены на три характерных участка:

I-й участок площадью 40 % на нем осуществляется загрузка (выгрузка) щепы карманов, вращающегося ротора с последующей транспортировкой щепы в варочный котёл. Получены математические модели: 1) производительности и скорости перемещения гидросмеси через питатель; 2) расчёт пропускной способности гидросмеси через питатель; 3) формирование гидросмеси; 4) выравнивание концентрации щепы в гидросмеси в начале и в конце загрузки корма ротора.

II-й участок площадью 50 % – выполняются вспомогательные функции запорного устройства. Получены математические модели прохождения протечек щелочи через зазоры в питателе; формирование гидроударов и вибраций в питателе, под действием которых происходит формирование индикаторных рисунков износа на конических поверхностях.

III-й участок площадью 10 % – это основание и средние перемычки ротора и корпуса на этих участках в течении всего времени эксплуатации сохраняет-

ся постоянная конусность, которая позволяет постоянно компенсировать критический зазор при граничном трении, или осуществлять принудительную микротолчковую компенсацию зазора при жидкостном трении.

4. Анализ механизмов износа и закономерностей формирования индикаторных рисунков на конических поверхностях трибоузлах роторных питателях ТЗС. Изнашивание – основной фактор, ограничивающий срок службы роторных питателей ЗТС. Каким видам изнашивания подвергаются рабочие конические поверхности роторных питателей в технической литературе отсутствует. На основании оптимизации функциональных параметров и их декомпозиции сделан анализ механизмов износа. В порядке убывания все виды изнашивания можно расположить в ряд: 1) гидроабразивный; 2) абразивный при срезании щепы; 3) ударно-гидроабразивный; 4) абразивный; 5) коррозионный; 6) абразивный износ при заедании.

Из рис. 2 видно, что коррозионный износ (кривая 1) распределяется равномерно. На передней поверхности ротора имеет место как абразивный износ, (кривая 2), так и износ в результате срезания щепы (кривая 3). На задней кромке ротора имеет место ударно-абразивный износ (кривая 4). На всей поверхности имеет место гидроабразивный износ при малых углах атаки (кривая). Если суммировать все виды износа по длине окружности ротора, то мы получим кривую 6.

5. Совершенствование конструкции деталей и узлов конических трибоузлов ТЗС. Получен, проанализирован и обобщен новый экспериментальный материал, который позволяет с использованием теоретических положений разработать ряд конструктивных решений, направленных на повышение надежности и производительности питателей путем:

- сокращение числа переточек рубашки (а. с. № 1612019, 1008317, 947245, 1194932);

Рис. 2. Распределение износа по рабочей поверхности ротора: 1 – коррозионный износ; 2 – абразивный износ передней поверхности ротора; 3 – износ передней поверхности ротора при срезании щепы; 4 – ударно-абразивный износ задней поверхности ротора; 5 – гидроабразивный износ при малых углах атаки; 6 – суммарный износ рабочей поверхности ротора

- улучшение свойств режущего механизма (а. с. № 1375705);

- использование в питателе Камюр жесткой решетки и гибких элементов (а. с. №1375705);

- устройства для снижение гидрударов в питателе Камюр (а. с. № 1194932);

- введение формирующего устройства с целью ускорения процесса выгрузки из карманов ротора мелкой щепки и опилок;

- увеличение объемов карманов ротора за счет введения ребер жесткости и облицовочного коррозионного слоя, расположение перегородок под углом к радиальной плоскости (а. с. № 1294893).

Дана технико-экономическая оценка и показано практическое внедрение разработок:

- внедрена измененная конусность 1/15 вместо 1/20 на Котласском и Архангельском ЦБК, которое позволило увеличить срок службы питателей в 1,25-1,5 раза;

- внедрена увеличенная со 100 до 125 мм присадка ротора на Архангельском ЦБК, которая дала увеличение срока службы на 25 %;

- внедрена ступенчатая конструкция рубашки корпуса на Архангельском ЦБК, которая снизила массу рубашки на 35 %;

- испытана партия износостойких и дешевых втулок на Архангельском ЦБК. Вместо дорогой втулки с монель-металла (50 % миди и 48 % никеля). Внедрение этих материалов с 1990 по 2000 г. дало экономический эффект более 2 миллионов долларов;

- на всех предприятиях области внедрена автоматическая наплавка ротора. Сроки наплавки сократились с 15 суток до одних;

- на всех предприятиях области введена термообработка роторов с последующим их ультразвуковым контролем. Внедрение этих мероприятий позволило целиком устранить разрушение роторов в процессе эксплуатации;

- основные разработки концепции защищены изобретениями (17 авторских свидетельств и четыре патента Украины) и реализованы на многих предприятиях отрасли (Херсонском, Архангельском, Котласском, Пермском, Сегежском ЦБК, Братском, Сыктывкарском ЛПК).

6. Оптимизация эксплуатационных параметров ТЗС. Экспериментальным путем установлено и теоретически подтверждено наличие циклически повторяющих режимов эксплуатации роторных питателей: стабильный продолжительностью 1,0-7,0 суток и нестабильный (патологический) продолжительностью 0,5-2 мин. Нестабильный режим эксплуатации происходит при ККЗ. Вместо ККЗ разработана новая схема ПМКТКЗ, что позволяет: снизить интенсивность износа деталей, которые соединяются в 12-25 раз; увеличить срок службы в 2-4 раза, уменьшить погрузки на привод ротора в 2-3 раза, заменить граничное трение жидкостным трением, снизить требования к выбору антифрикционной пары материалов ротора, корпуса.

Разработаны теоретические основы построения циклограмм роторных питателей:

- предложены математические зависимости для определения продолжительности технологических операций за цикл работы питателя;

- выполнен сравнительный анализ циклограмм питателей разной производительности, которые позволяют оценить их эффективность из позиций производительности и сложности управления технологическим циклом;

- предложена классификация питателей по группам в зависимости от соотношения времени загрузки и разгрузки.

Исследована и определена оптимальная частота вращения ротора питателя, обеспечивающая максимальную производительность ТЗС.

7. Оптимизация технологических параметров питателей ТЗС. Экспериментальным путем установлены оптимальные режимы восстановления деталей и узлов роторных питателей при изготовлении и ремонте:

1) Схема ремонта с многослойной расходуемой рубашкой (корпус с запрессованной расходуемой рубашкой; "родно" наплавляемый ротор с использованием заглушек для автоматической наплавки; замена расходуемой рубашки; снятие многослойной наплавки);

2) Схема ремонта без наплавки (корпус с запрессованной расходуемой рубашкой; выбор из большого числа по размеру роторов для рубашки корпуса);

3) Схема ремонта с комбинированной наплавкой (корпус с запрессованной расходуемой рубашкой; "родной" ротор с использованием комбинированной рубашки из листового материала; последовательный износ рубашки и наращивание на ротор рубашки; замена израсходованной рубашки и снятия комбинированных рубашек с ротора.

Выводы

1.В работе решена важная для народного хозяйства Украины проблема повышения эффективности использования конических трибоузлов в автоматизированных транспортно-загрузочных системах.

2. Разработана концепция и решена проблема повышения эффективности транспортно-загрузочной системы за счет оптимизации функциональных, эксплуатационных, конструктивных и технологических параметров.

3. Разработаны методы повышения эффективности функционирования транспортно-загрузочной системы за счет использования высоконадежных, продуктивных и безаварийных конических трибосистем.

4. Обработка экспериментальных данных, полученных на действующих установках Камюр, Пондия и Бауэр раскрыла новые перспективные направления в совершенствовании функциональных, эксплуатационных, конструктивных и технологических характеристик конических трибоузлов.

Список литературы

1. Нечаев Г.И., Камель Г.И. Повышение надежности и продуктивности загрузочных устройств непрерывной варки целлюлозы и полуцеллюлозы. – Монография. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2005. – 392 с.
2. Трение, изнашивание и смазка /Справочник. Под общей редакцией Крегельского Н.В., Алисина В.В. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.

Одержано 11.07.2006

У даній статті наведено концепцію підвищення техніко-економічної ефективності транспортно-завантажувальної системи шляхом оптимізації функціональних, конструктивних, експлуатаційних і технологічних параметрів.

The conception of technical-economical effectiveness of transport load system due to optimization of functional, exploitation, constructive and technological parameters was shown.

УДК 669.187.2:004.383.4

Канд. техн. наук В. В. Зиновкин, В. В. Карпенко, О. Г. Волкова

Национальный технический университет, г. Запорожье

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПЛАВЛЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ

Предложена математическая модель активной мощности, которая изменяется во времени по резкопеременному закону, для использования с целью эффективного управления электротехнологическими режимами комплексов. Приведен сравнительный анализ расчетов мощности с измеренными ее значениями в реальных условиях работы дуговой сталеплавильной печи.

Состояние вопроса

Проектирование новых и повышение эффективности функционирования действующих электротехнологических комплексов в составе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) в настоящее время характеризуется устойчивой тенденцией энерго- и ресурсосбережения. Разработка энергосберегающих технологий требует учета реальных электрических режимов и условий эксплуатации электротехнологического и электротехнического оборудования комплексов [1, 2]. Электротехнологические режимы ДСП характеризуются резкопеременными вероятностными параметрами [3, 4]. Температурные режимы ДСП обеспечиваются, преимущественно, введением активной мощности от электропечного трансформатора. Существующие системы автоматизированного управления (САУ) мощностью в зависимости от текущего температурного режима ДСП основаны на детерминированном анализе директивных графиков электротехнологического режима. При этом вероятностный характер тока, напряжения и мощности не учитывается. Это приводит к несвоевременному срабатыванию исполнительных механизмов электроприводов. В результате имеют место поломки электродов, неэффективное использование электроэнергии, снижение качества сталей и их механических характеристик. Поэтому для повышения эффективности работы электротехнологических комплексов необходимо учитывать вероятностный характер параметров резкопеременных нагрузок (тока, напряжения, мощности), что подчеркивает актуальность таких исследований.

Целью настоящей работы является разработка математической модели вероятностных параметров активной мощности ДСП для дальнейшего использования в многопараметрической САУ электротехнологическими режимами комплексов.

Математическая модель вероятностного анализа резкопеременной нагрузки

Поскольку резкопеременная нагрузка ДСП обусловливает случайный характер реальных электромагнитных параметров в электротехнологическом комплексе, то ее удобно исследовать вероятностно-статистическим методом [5-7]. В качестве примера на рис. 1 приведен график реальной мощности, потребляемой ДСП-100 в составе электротехнологического комплекса [3].

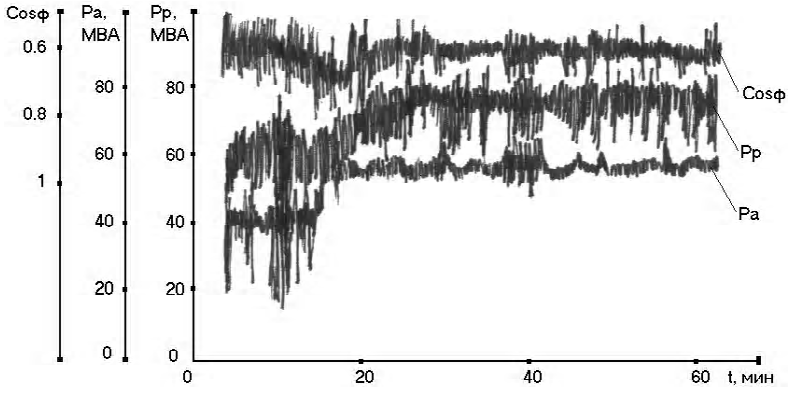


Рис. 1. Регистограмма активной (P_a) и реактивной (P_p) составляющих, а также коэффициента мощности ($\cos\varphi$) ДСП-100 И6 электротехнологического комплекса в течение технологического цикла

© В. В. Зиновкин, В. В. Карпенко, О. Г. Волкова, 2006

Сравнительный анализ директивной мощности и регистограммы показал, что в директивной мощности не учитываются колебания реальной электрической нагрузки. Поскольку активная мощность $P_a(t)$ пропорциональна температурным режимам электротехнологического комплекса, то ее математическая модель будет способствовать оперативному управлению ими. С вероятностно-статистической точки зрения, активная мощность представляет собой "нестационарную по математическому ожиданию" случайную функцию. Поэтому ее вероятностную модель $P_a^{м}(t)$ представляем в виде, аналогично [5]

$$P_a^{м}(t) = P_a^{мс}(t) + m_P(t), \qquad (1)$$

где $P_a^{мс}(t)$ – вероятностная модель стационарной составляющей активной мощности; $m_P(t)$ – математическое ожидание мощности.

Построение математической модели $P_a^{мс}(t)$ для стационарной составляющей активной мощности сформулируем с учетом необходимости нахождения такой случайной функции $P_a^{мс}(t,\xi_1,\xi_2,\chi)$, для которой выполнялись бы критерии соответствия статистических характеристик модели и реальной мощности (здесь $\xi_1(s),\xi_2(s),\chi(u)$ – независимые случайные величины, s,u – аргументы случайных величин, t – текущее время). Решение модели осуществляем в области следующих начальных и граничных условий:

$$m_{P_a^{мс}}(t) = 0\Big|_{\sum_{k=1}^{N} P_k^{(м)}(t) = \sum_{k=1}^{N} P_k^{(о)}(t)}, \qquad (2)$$

$$r_{P_a^{мс}}(\tau) = r_P(\tau)\Big|_{\sum_{k=1}^{N} P_k^{(м)}(t) = \sum_{k=1}^{N} P_k^{(о)}(t)}, \qquad (3)$$

$$f_{P_a^{мс}}(u) = f_P(u)\Big|_{\sum_{k=1}^{N} P_k^{(м)}(t) = \sum_{k=1}^{N} P_k^{(о)}(t)}. \qquad (4)$$

В условиях (2)-(4) приняты обозначения: $m_{P_a^{мс}}(t)$, $r_{P_a^{мс}}(\tau)$, $f_{P_a^{мс}}(u)$ – математическое ожидание, нормированная корреляционная функция и одномерная плотность распределения вероятности модели $P_a^{мс}(t,\xi_1,\xi_2,\chi)$; $r_P(\tau)$, $f_P(u)$ – нормированная корреляционная функция и одномерная плотность распределения вероятности реальной мощности $P_a(t)$; τ – интервал корреляции; $P_k(t)$ – гармоническая составляющая мощности, индексами $(м)$ и $(о)$ обозначены модель и оригинал (реальная мощность); k – порядковый номер гармоники; N – общее количество гармоник.

Дальнейшие преобразования сводятся к использованию метода неканонических разложений [6]. В результате случайную функцию $P_a^{мс}(t,\xi_1,\xi_2,\chi)$ представляем в виде

$$P_a^{мс} = \xi_1(s)\cos\chi(u)t + \xi_2(s)\sin\chi(u)t. \qquad (5)$$

С целью конкретизации решаемой задачи вводим следующие обозначения:

$$\left.\begin{aligned}\xi_1(s) &= \xi(s)\cos\theta(v);\\ \xi_2(s) &= -\xi(s)\sin\theta(v),\end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

где $\xi(s)$, $\theta(v)$ – независимые случайные величины; v – аргумент случайной величины θ. В силу соблюдения условий стационарности $P_a^{мс}(t)$, независимая случайная величина $\theta(v)$ должна быть распределена равномерно на интервале $(0;2\pi)$.

Подставляя (6) в (5) и применяя формулу косинуса суммы двух углов, приходим к уточненному представлению случайной функции

$$P_a^{мс} = \xi(s)\cos(\chi(u)t + \theta(v)). \qquad (7)$$

Равенство (7) представляет собой вероятностную модель стационарной составляющей активной мощности ДСП, которая является функцией трех случайных величин. Их параметры определяем из критериев (2), (3) и (4), преобразованных к следующим выражениям:

$$M[\xi] = 0, \qquad (8)$$

$$M[\xi^2] = 2D_P, \qquad (9)$$

$$f_\chi(u) = \frac{S_P(\chi)}{2\pi D_P} = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty r_P(\tau)\cos(u\tau)d\tau, \qquad (10)$$

$$f_\xi(s) = 2s\left(\frac{f_P(P_{\max})}{\sqrt{{P_{\max}}^2 - s^2}} + \int_{P_{\max}}^{s}\frac{{f_P}'(u)du}{\sqrt{u^2 - s^2}}\right), \qquad (11)$$

где $M[\xi]$, $M[\xi^2]$ – математическое ожидание случайной величины ξ и квадрата случайной величины ξ соответственно; D_P, $S_P(\chi)$, – дисперсия и спектральная плотность реальной активной мощности $P_a(t)$; $f_\chi(u)$ – плотность распределения вероятности случайной величины χ; $f_\xi(s)$ – плотность распределения

вероятности случайной величины ξ; $P_{\max}$ – верхняя граница области задания мощности $P_a(t)$; $f_P{}'(u)$ – первая производная плотности распределения вероятности $P_a(t)$.

В таблицах 1 и 2 приведены частные решения функций $f_\chi(u)$ и $f_\xi(s)$ с учетом соответствующих начальных и граничных условий $r_P(\tau)$ и $f_P(u)$, полученные из уравнений (10) и (11) соответственно.

Таблица 1 – Частные решения функции $f_\chi(u)$ при соответствующих начальных и граничных условиях $r_P(\tau)$

$r_P(\tau)$	$f_\chi(u)$
$e^{-h\lvert\tau\rvert}$, $h>0$	$\frac{h}{\pi(u^2+h^2)}$, $u\in(-\infty,\infty)$
$e^{-h\lvert\tau\rvert}\cos(\beta\tau)$, $h>0$, $\beta>0$	$\frac{h}{2\pi}\left(\frac{1}{h^2+(\beta+u)^2}+\frac{1}{h^2+(\beta-u)^2}\right)$, $u\in(-\infty,\infty)$
$e^{-\frac{h^2\tau^2}{2}}$, $h>0$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}h}e^{-\frac{u^2}{2h^2}}$, $u\in(-\infty,\infty)$
$\frac{\sin(a\tau)}{a\tau}$, $a>0$	$\begin{cases}\frac{1}{2a}, u\in[-a,a]\\ 0, \lvert u\rvert>a\end{cases}$
$\frac{1}{1+h^2\tau^2}$, $h>0$	$\frac{1}{h}e^{-\frac{\lvert u\rvert}{h}}$, $u\in(-\infty,\infty)$

Таблица 2 – Частные решения функции $f_\xi(s)$ при соответствующих начальных и граничных условиях $f_P(u)$

$f_P(u)$	$f_\xi(s)$
$\frac{1}{\sqrt{2\pi D_p}}e^{-\frac{u^2}{2D_p}}$, $u\in(-\infty,\infty)$	$\frac{s}{D_p}e^{-\frac{s^2}{2D_p}}$, $s>0$
$\frac{\alpha}{2}e^{-\alpha\lvert u\rvert}$, $u\in(-\infty,\infty)$	$\alpha^2 s K_0(\alpha s)$, $s>0$
$\frac{1}{\pi D_p}K_0\left(\frac{\lvert u\rvert}{D_p}\right)$, $u\in(-\infty,\infty)$	$\frac{1}{D_p}e^{-\frac{s}{D_p}}$, $s>0$
$\frac{1}{\pi a}arch\frac{a}{u}$, $u\in[-a,a]$	$\frac{1}{a}$, $s\in[0,a]$
$\frac{k\sqrt{k}}{\pi\sqrt{\pi}}u^2e^{-\frac{ku^2}{2}}\left(K_0\left(\frac{ku^2}{2}\right)+K_1\left(\frac{ku^2}{2}\right)\right)$, $u\in(-\infty,\infty)$	$\frac{4k\sqrt{k}}{\sqrt{\pi}}s^2e^{-ku^2}$, $s>0$

В таблице 2 приняты обозначения: K_0, K_1 – функции Макдональда первого и второго порядков соответственно.

Для синтеза предлагаемой модели активной мощности электротехнологического комплекса, которая изменяется во времени по резкопеременному закону, выполним анализ возможных условий построения математического ожидания $m_P(t)$. С этой целью данную функцию представляем как "импульсную" в соответствующих интервалах

$$m_P(t) = \begin{cases} m_{P1}, 0 < t < t_1 \\ m_{P2}, t_1 < t < t_2 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ m_{Pn}, t_{n-1} < t < t_n \end{cases}, \qquad (12)$$

где m_{P1}, m_{P2}, …, m_{Pn} – значения математического ожидания мощности, постоянные на соответствующих временных интервалах.

Для преобразования системы (12) применяем δ-функцию, которая используется при аналитическом описании импульсных сигналов [7]. В результате система (12) преобразуется в следующее уравнение:

$$m_P(t) = m_{P1}\delta(m_P - m_{P1}) + \\ + m_{P2}\delta(m_P - m_{P2}) + \ldots + m_{Pn}\delta(m_P - m_{Pn}). \quad (13)$$

Отсюда видно, что для получения математического ожидания требуется определить значения m_{P1}, m_{P2}, …, m_{Pn} по имеющейся реализации моделируемой мощности, аналогично тому, как это рассмотрено в работе [7]. Относительная погрешность расчета значений математического ожидания на соответствующих интервалах не превышает 3 %. Практическая реализация математической модели (13) осуществляется посредством логических функций.

Подставляя соотношения (7) и (13) в уравнение (1) получим обобщенную математическую модель для активной мощности, потребляемой ДСП в составе электротехнологического комплекса

$$P_a^M = \xi(s)\cos(\chi(u)t + \theta(v)) + m_{P1}\delta(m_P - m_{P1}) + \\ + m_{P2}\delta(m_P - m_{P2}) + \ldots + m_{Pn}\delta(m_P - m_{Pn}). \qquad (14)$$

Структура реализации математической модели (14) на ПЭВМ приведена на рис. 3.

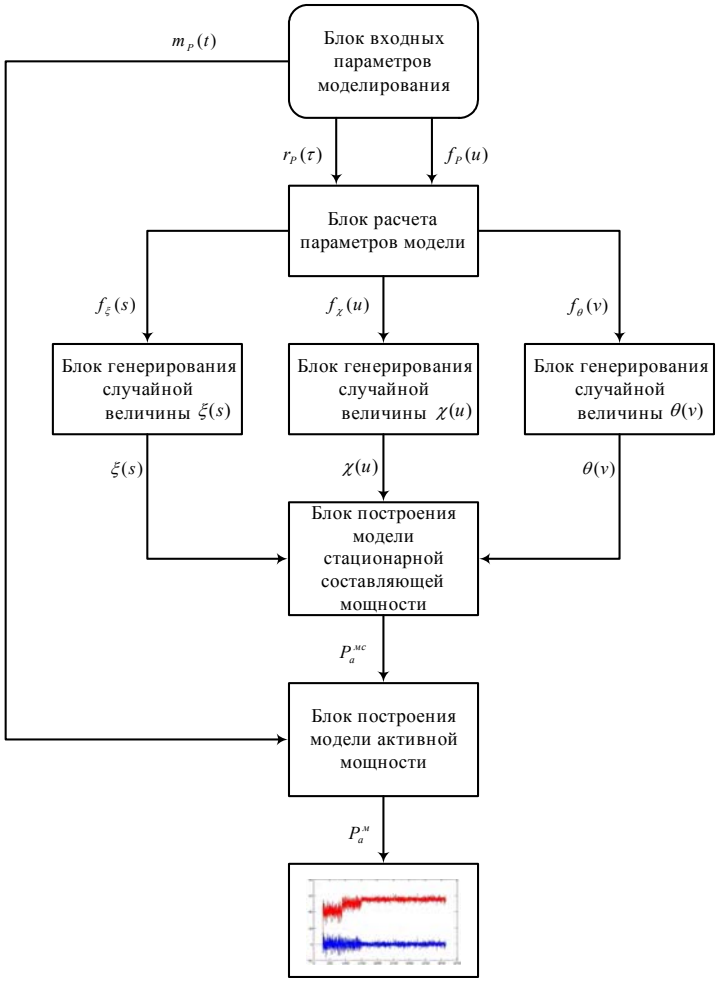


Рис. 3. Структурная схема математической модели активной мощности электротехнологического комплекса, изменяющейся во времени по резкопеременному закону

Результаты исследований и их анализ

Моделирование резкопеременной мощности осуществлялось на ПЭВМ с частичным использованием системы MathCAD. В качестве исходных данных использовались следующие соотношения:

$$r_P(\tau) = e^{-h|\tau|}, \qquad (15)$$

$$f_P(u) = \frac{1}{\pi a} arch \frac{a}{u}, \qquad (16)$$

$$m_P(t) = \begin{cases} 0{,}0 < t < 5 \\ 40{,}5 < t < 15 \\ 50{,}15 < t < 25 \\ 55{,}25 < t < 70 \end{cases}. \qquad (17)$$

Результаты моделирования активной мощности ДСП-100 И6 и ее стационарной составляющей показаны на рис. 4. Сравнительный анализ мощности, полученной на математической модели (рис. 4) и измеренной в условиях реальной работы электротехнологического комплекса (рис. 1) показал довольно хорошую сходимость.

При построении модели активной мощности, с помощью функций быстрого преобразования Фурье (БПФ), для нее были получены спектрограмма амплитуд и фаз гармонических составляющих (приведена на рис. 5), а также спектральная плотность (приведена на рис. 6).

Эти спектральные характеристики согласуются с приведенными в работе [4] для экспериментальных измерений активной мощности, что подтверждает эффективность использования предложенной модели.

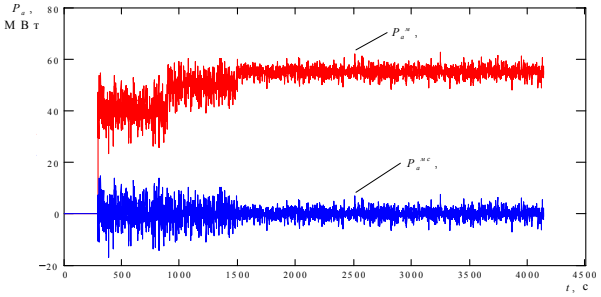
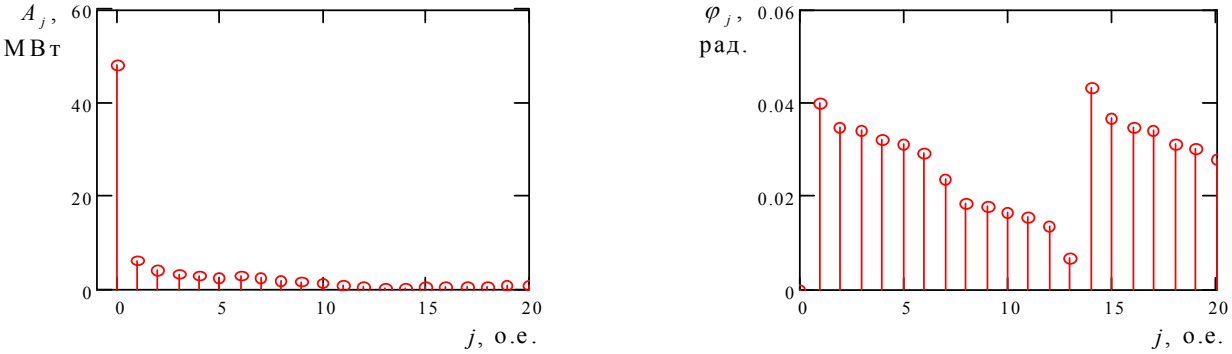


Рис. 4. Модели активной мощности ДСП-100 (P_a^M) и ее стационарной составляющей (P_a^{MC})



а б

Рис. 5. Спектрограмма амплитуд (а) и фаз (б) гармоник с номерами $j = 0 \div 20$ для реализации модели активной мощности

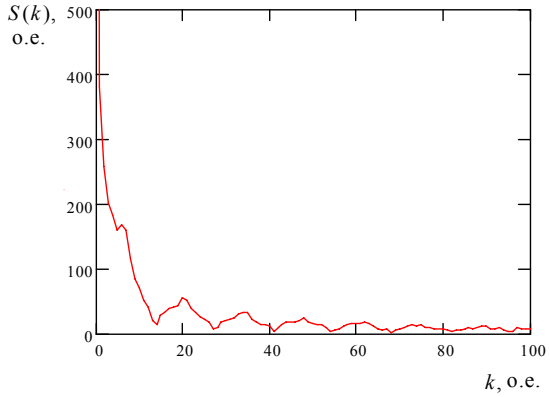


Рис. 6. Спектральная плотность модели активной мощности для k гармоник частоты

Выводы

1. Предложена математическая модель активной мощности ДСП, изменяющейся во времени по резкопеременному закону, которая позволяет стабилизировать тепловой режим комплекса, повысить его эффективность и уменьшить непроизводительные потери электроэнергии.

2. Результаты моделирования мощности согласуются с измеренной в условиях реальной эксплуатации комплекса с достаточной для инженерных расчетов точностью (погрешность не превышает 9 %).

3. Разработанную модель целесообразно адаптировать к другим резкопеременным параметрам: току, напряжению, а также реактивной составляющей и коэффициенту мощности и использовать при модернизации САУ электроприводами комплекса.

Список литературы

1. Гасик М.И., Овчарук А.Н., Деревянко И.В. Выплавка стали в дуговых печах машиностроительного комплекса с заменой чугуна углеродкарбидкремниевыми брикетами// Электрометаллургия. – 2006. – №9. – С. 2-13.
2. Лопухов Г.А. Мировое производство стали// Электрометаллургия. – 2006. – №9. – С. 36-38.
3. Зиновкин В.В., Рассальский А.Н. Особенности электротехнологических режимов энергоемких металлургических комплексов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1998. – №2. – С. 151-154.
4. Зиновкин В.В. Вероятностные параметры резкопеременных нагрузок энергоемких электротехнологических комплексов // Праці ІЕД НАН України. – 2005. – №1(10). – С. 136-144.
5. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1962. – 883 с.
6. Астапов Ю.М., Медведев В.С. Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
7. Виленкин С.Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. – М.: Энергия, 1979. – 250 с.

Одержано 18.10.2006

Запропоновано математичну модель активної потужності, яка змінюється у часі за різкозмінним законом, для використання з метою ефективного управління електротехнологічними режимами комплексів. Наведено порівняльний аналіз розрахунків потужності з виміреними її значеннями в реальних умовах роботи дугової сталеплавильної печі.

The mathematical model of active power which changes in time according to sharply changing law applying for the purpose of effective management of complex electrical technological regimes was given. The comparative analysis of power calculation with it's measured parameters in real conditions of arc steel-melting furnace were shown.

УДК 539.3

Канд. фіз.-мат. наук Г. А. Шишканова

Національний технічний університет, м. Запоріжжя

РОЗРАХУНОК КОНТАКТНОГО ТИСКУ ПІД ПРЯМОКУТНИМИ ШТАМПАМИ З УРАХУВАННЯМ ТЕРТЯ

З використанням методів регуляризації, послідовних наближень та кубатурних формул отримано розв'язок просторових контактних задач для плоских прямокутних двозв'язних штампів з урахуванням тертя. Знайдено розподіл нормального тиску, форму області контакту, кут нахилу та заглиблення штампа. Запропонований підхід може бути застосований в інженерній практиці.

Вступ

Підвищення надійності та зниження металомісткості – це одні з основних проблем сучасного машинобудування. Для оптимального вирішення цих задач необхідно удосконалювати розрахунки міцності при проектуванні різноманітних конструкцій. Оскільки кожна машина є сукупністю взаємодіючих деталей, необхідно забезпечувати їх контактну міцність та жорсткість.

Контактна взаємодія елементів конструкцій та деталей машин супроводжується тертям або можлива тільки при його наявності. Тому питання врахування тертя при створенні нових технологій у машинобудуванні є досить актуальним.

З аналізу публікацій бачимо, що математична теорія розв'язання контактних задач добре розвинута для кругових, еліптичних та кільцевих областей контакту [1-6]. Проте, ще не досить дослідженими залишають-

© Г. А. Шишканова, 2006

ся задачі зі складною геометрією області контакту та врахуванням тертя. Так, без урахування сил тертя одержано наближені розв'язки задач для штампів з формою основи, близькою до прямокутної в плані в роботі [7], для двозв'язної основи – в роботі [8], аналітичні розв'язки задач для штампів з двозв'язною формою основи, близькою до квадрата в плані, – в роботі [9], до прямокутника – в роботі [10]. Чисельно-аналітичний розв'язок задачі про штамп з квадратною двозв'язною формою основи з урахуванням сили тертя та шорсткості пружного півпростору запропоновано в роботі [11].

Метою даної роботи є розв'язання задачі про вдавлювання штампа, що має в плані форму прямокутника з урахуванням тертя, а також дослідження характеристик контакту при зміні геометричних розмірів основи та впливу сили тертя.

Постановка задачі

Розглядається просторова квазістатична контактна задача про рух штампа, що має в плані форму прямокутника, по межі пружного півпростору. Нехай на штамп діє вертикальна сила Q та горизонтальна сила T, яка урівноважується силою тертя. Силу T прикладено на відстані d від основи штампа.

Введемо систему координат з віссю z направленою перпендикулярно до площини пружного півпростору. При цьому вісь x є паралельною напрямку руху штампа, а початок координат співпадає з центром симетрії області контакту. Лінія дії вертикальної сили проходить крізь цю точку. Приймаємо, що сила тертя колінеарна напрямку руху.

Задача зводиться до розв'язку системи рівнянь рівноваги та основного інтегрального рівняння, яке при лінійному законі тертя [2] $\tau = \mu\sigma$ є рівнянням типу Фредгольма першого роду зі слабкою особливістю

$$\frac{1-\nu^2}{\pi E}\iint_S \frac{p(\rho',\theta')}{r}\left[1+\varepsilon_1\cos r, x\right]ds' = g(\rho,\theta), \quad (1)$$

тут $\varepsilon_1 = \mu\tilde{\lambda}$, μ – коефіцієнт тертя, $\tilde{\lambda} = \frac{(1-2\nu)}{2\cdot(1-\nu)}$, ν – коефіцієнт Пуассона, $p(\rho,\theta)$ – функція, що характеризує розподіл нормального тиску під штампом, $r^2 = \rho'^2+\rho^2-2\rho\cdot\rho'\cos(\theta-\theta')$, $(\rho',\theta')\in S$, $(\rho,\theta)\in S$, функція $g(\rho,\theta)$ – залежить від форми поверхні штампа, його заглиблення, кутів повороту (у випадку плоского штампа $g(\rho,\theta)=\delta$, де δ – заглиблення штампа).

Методика розв'язання задачі

Рівняння (1) належить до інтегральних рівнянь першого роду, задача розв'язання яких є некоректною за Ж. Адамаром, хоча б з причини того, що порушується стійкість розв'язку. О.М.Тихонов розвинув підхід, який дає стійкі розв'язки суттєво некоректних задач. Цей підхід щодо інтегрального рівняння першого роду полягає в зведенні до задачі розв'язку інтегрального рівняння другого роду, яка вважається коректною.

Регуляризація рівняння (1) приводить розв'язок рівняння (1) до розв'язку рівняння другого роду при $B=0$:

$$Bp(\rho,\theta)+ \\ +\frac{1-\nu^2}{\pi E}\iint_S \frac{p(\rho',\theta')}{r}\left[1+\varepsilon_1\cos r, x\right]ds' = \delta, \quad (2)$$

яке можна розглядати як основне інтегральне рівняння задачі про вдавлення штампа в пружний шорсткий півпростір з урахуванням тертя [11]. Вертикальними переміщеннями мікровиступів, обумовлених дією дотичної сили, нехтуємо. В рівнянні (2) B – це коефіцієнт, який характеризує деформаційні властивості шорсткості поверхні пружного півпростору [2].

Після введення заміни $B_1 = B\pi E/\left(\left(1-\nu^2\right)\cdot b\right)$; $P(\rho,\theta) = \left(1-\nu^2\right)/(\pi E)\cdot p(\rho,\theta)$ [2]; $B_1/(2\pi) = 1-\alpha$ [6], при цьому вважаємо також, що $b = 1$ (в умовних одиницях довжини), тоді рівняння (2) приймає вигляд

$$(1-\alpha)\cdot P(\rho,\theta)+ \\ +\iint_S \frac{P(\rho',\theta')}{2\pi br}\left[1+\varepsilon_1\frac{\rho\cos\theta-\rho'\cos\theta'}{r}\right]ds' = \frac{\delta}{2\pi b}. \quad (3)$$

При наближеному розв'язанні інтегрального рівняння (3) для дискретизації інтегрального оператора М.М. Боголюбовим та М.М.Криловим розроблено ефективний метод заміни інтегрального рівняння системою алгебраїчних рівнянь, який використовує середні значення шуканої функції на кожній ділянці розбиття області інтегрування [6]. Для усунення особливостей запропоновано введення різниці значень шуканої функції в різних точках та наступна інтерполяція доданків, де співпадають індекси точок [6, 11].

Застосовуючи одну з кубатурних формул за методикою, яку наведено в [11], одержуємо для чисельного розв'язку основного рівняння з урахуванням сили тертя такі рекурентні вирази для малих B_1:

$$P_{k,q}^{(m+1)} = \alpha P_{k,q}^{(m)} - \sum_{i=1}^{n}\sum_{l=1}^{p}\left(P_{i,l}^{(m)} - P_{k,q}^{(m)}\right)A_{i,l} - \\ - P_{k,q}^{(m)}\sum_{i=1}^{n}\sum_{l=1}^{p}A_{i,l} + \frac{\delta}{2\pi b}, \quad (4)$$

де $A_{i,l} = \left[1+\frac{\varepsilon_1\left(t_k\cos\tau_q - s_i\cos\theta_l\right)}{r}\right]\cdot\frac{s_i\Delta s_i\Delta\theta_l}{2\pi br}$,

$$P_{k,q} = \frac{\left(1-\nu^2\right)}{\pi E}P\left(t_k,\tau_q\right),$$

$$r^2 = t_k^2 + s_i^2 - 2t_k s_i \cos(\theta_l - \tau_q),$$

$$P(t_k, \tau_q) = 0,\ (t_k, \tau_q) \notin S.$$

Аналіз результатів чисельного дослідження

Проведено чисельні розрахунки конкретних випадків за методикою, яку наведено вище, для дослідження впливу ширини кільця, висоти прикладення горизонтальної сили та коефіцієнта тертя на розподіл нормального тиску під штампом, який має основу в формі двозв'язного, як окремий випадок, однозв'язного прямокутника в плані.

Лінії рівного тиску на рис. 1-3 при значеннях безрозмірних параметрів $\varepsilon_1 = 0{,}057$; $d/b = 0{,}3$; $\alpha = 0{,}99$, показують розподіл нормального тиску $p(\rho,\theta)/p^*$, $p^* = Q/(2\pi b^2)$ по області контакту, зовнішній контур якої є прямокутником з розмірами сторін: та, що паралельна осі ox дорівнює двом відносним одиницям довжини, а паралельна осі oy – має довжину 1, 2. Внутрішньому контуру на рис. 1 відповідає прямокутник з розмірами сторін 1 та 0,6 відповідно, а на рис. 2 – з розмірами сторін 1,2 та 0,36. На рис. 3 зображено однозв'язну прямокутну область контакту.

Розраховано величину $\gamma^* = \gamma/(Q/(2\pi b))$, що характеризує кут нахилу штампа. Відповідні значення для рис. 1 – $\gamma^* = 0{,}25$; для рис. 2 – $\gamma^* = 0{,}24$; для рис. 3 – $\gamma^* = 0{,}23$.

Із побудованих картин кривих рівного тиску випливає несиметричність розподілу тиску по області контакту в зв'язку з присутністю сили тертя, а також наявність під штампами точок з мінімальним тиском. Більша несиметричність в розподілі нормального тиску та більше значення кута нахилу штампа відповідає меншій контактній площі (рис. 1-3).

На рис. 4 зображено графіки залежностей нормального тиску при різних значеннях висоти d прикладення горизонтальної сили T в перерізі $\theta = 0; \pi$ для значень безрозмірних параметрів $\varepsilon_1 = 0{,}057$; $\alpha = 0{,}7$ та області контакту, зображеної на рис. 2. Лінії 1-4 відповідають значенням $d/b = 0{,}1$; 0,5; 0,7; 1; 1,5. Зростання висоти прикладення горизонтальної сили призводить до більшої несиметричності розподілу тиску, що може призвести до відриву штампа від поверхні пружного півпростору.

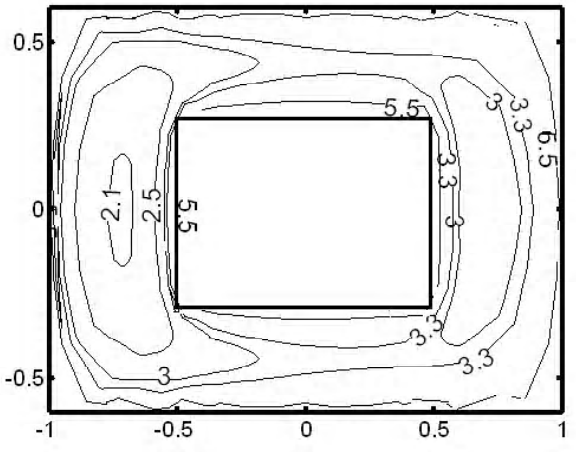


Рис. 1.

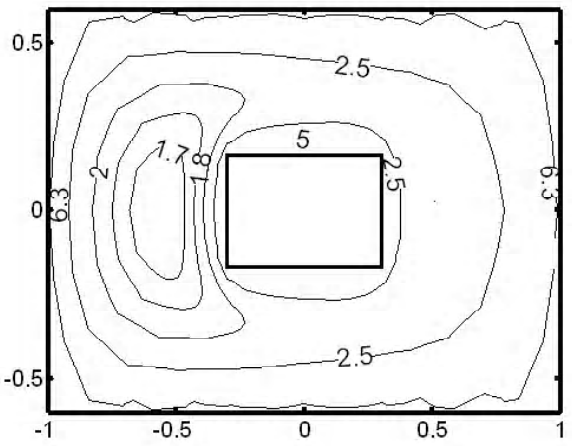


Рис. 2.

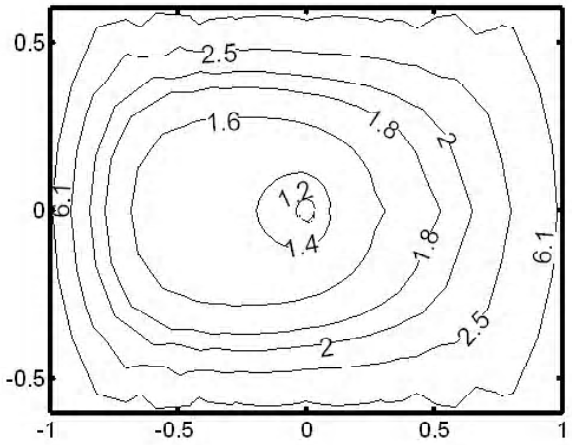


Рис. 3.

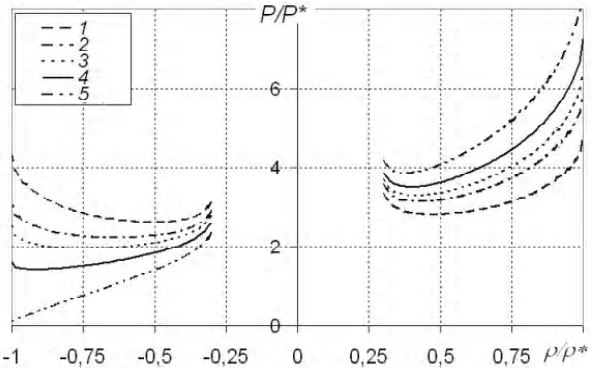


Рис. 4.

Висновки

За допомогою використання кубатурних формул, регуляризації, введення різниці значень шуканої функції в різних точках та наступної інтерполяції доданків для усунення особливостей запропоновано метод розв'язання контактних задач з урахуванням тертя, шорсткості пружного півпростору. Розглянуто задачу про вдавлювання штампа, який має форму прямокутного кільця в плані.

Наведено числові приклади, які підтверджують правильність та ефективність запропонованого методу розв'язання, який може бути застосований в інженерній практиці при проектуванні елементів конструкцій та деталей машин, а також для розрахунків на контактну міцність та жорсткість.

Список літератури

1. Гузь А.Н., Рудницкий В.Б. Контактная задача о давлении упругого штампа на упругое полупространство с начальными напряжениями // Прикладная механика.– 1984. – Т. 20, №8. – С. 3-11.
2. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии.– М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
3. Дырда В.И., Шишканова А.А. Математическое моделирование подвижного эластостатического контакта при двучленном законе трения // Вестник Севастопольского техн. ун-та. – Механика, энергетика, экология. – 1997. – Вып. 8. – С. 32-37.
4. Шишканова С.Ф. О вдавливании в упругое полупространство эллиптического штампа со скругленным краем // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1987. – №3. – С. 77-80.
5. Пожуев В.И., Зайцева Т.А. О решении пространственных контактных задач для некругового штампа // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 1994. – №4. – С. 62-70.
6. Шишканова А.А. Приближенное решение задачи о контакте кольцевого штампа с шероховатым полупространством с использованием разложения потенциала простого слоя // Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій.– 2003. – Т. 7.– С. 123-133.
7. Моссаковский В.И., Качаловская Н.Е., Голикова С.С. Контактные задачи математической теории упругости. – К.: Наук. думка. – 1985. – 175 с.
8. Рвачев В.Л., Проценко В.С. Контактные задачи теории упругости для неклассических областей. – К.: Наук. думка. – 1977. – 235 с.
9. Шишканова Г.А., Зайцева Т.А. Про розвинення потенціалу простого шару для некругового кільця та його використання // Вісник Херсонського техн. ун-та. – 2003. – №3. – С. 462-466.
10. Зайцева Т.А., Шишканова А.А. Решение пространственной контактной задачи для штампа с двусвязным основанием, близким к прямоугольному, с использованием малого параметра // Прикладные задачи математики и механики: Материалы XIV междунар. научной конф. (11-15 сентября 2006 г., Севастополь). – Севастополь: Севастопольский нац. техн. ун-т, 2006. – С. 11-14.
11. Шишканова А.А. О решении контактной задачи с учетом трения и шероховатости для штампа в форме двусвязного квадрата в плане // Вісник Донецького ун-ту. Серія А: Природничі науки. – 2004. – Вип. 1.– С. 95-102.

Одержано 11.09.2006

С использованием методов регуляризации, последовательных приближений и кубатурных формул получено решение пространственных контактных задач для плоских прямоугольных двусвязных штампов с учетом трения. Найдены распределение нормального давления, форма области контакта, угол наклона и заглубление штампа. Предложенный подход можно использовать в инженерной практике.

Using the regularization method, successive approximations and cubature formulas the solving of spatial contact problems for plane rectangular doubleconnected stamp taking into consideration friction was received. The distribution of normal pressure, form of contact region, pitch angle and stamp deeping was found. This method can be used in engineering practice.

УДК 539.5

Г. А. Козуб

Национальный университет, г. Запорожье

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

В статье предложена математическая модель поведения слоистого материала для решения нестационарных задач термоупругости на основе метода конечных элементов. Алгоритм решения нестационарных задач основан на применении неявной схемы дискретизации по времени.

Введение

В современной технике все более широкое применение находят слоистые композитные материалы. Анизотропные свойства таких материалов позволяют создавать рациональные конструкции и конструктивные элементы. Достижения в области расчета и проектирования таких конструкций достаточно широко обсуждаются в литературе. Но в то же время остается неисследованным вопрос о решении нестационарных задач термоупругости для конструкций, изготовленных из анизотропных материалов, в частности, из слоистых композитов. Применение аналитических методов для таких задач связано с определенными затруднениями, обусловленными различными причинами, например, достаточно сложной геометрической формой конструктивного элемента или сложным характером нагружения. Основной целью настоящей работы является разработка методики численного решения задач термоупругости на основе применения метода конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке.

Материалы и результаты исследований

На первом этапе решения задачи термоупругости необходимо определить температурное поле в теле. Для этого следует решить задачу теплопроводности. Применению МКЭ к задачам теплопроводности посвящено достаточно много опубликованных работ. Это связано, прежде всего, с большим количеством новых внедряемых в промышленность материалов и разнообразием конструкций из таких материалов. Кроме того, в большинстве работ применение МКЭ осуществляется на основе каких либо упрощающих гипотез. Рассмотрим методику решения задачи нестационарной теплопроводности для конструкций из слоистых материалов.

Уравнение нестационарной теплопроводности для анизотропного тела можно представить в виде [1]

$$\int_{t_1}^{t_2}\iiint_V \rho c T_{,t} T dv dt = \int_{t_1}^{t_2}\iiint_V \lambda^{ij} T_{,i} T_{,j} dv dt + \int_{t_1}^{t_2}\iiint_V \omega_0 T dv dt + \int_{t_1}^{t_2}\iint_S [q + h(T-\theta)] T ds dt, \quad (1)$$

где ρ – плотность, c – теплоемкость, λ^{ij} – тензор теплопроводности, ω_0 – мощность внутренних источников тепла, q – интенсивность тепловых потоков, h – коэффициент теплопередачи, θ – температура окружающей среды.

Применяя конечно-элементную дискретизацию по координатам и времени уравнение (1) можно привести к системе алгебраических уравнений. Функцию температуры можно представить в виде

$$T(x,t) = f(x)g(t). \quad (2)$$

Для конечного элемента, моделирующего поведение слоистого элемента конструкции, функция координат может быть представлена в виде

$$f(x) = \sum_{l=1}^{8} \varphi_{(l)}(x^1, x^2, x^3) T_{(l)}, \quad (3)$$

где $\varphi_{(l)}$ – функции формы слоистого конечного элемента.

$$\varphi_{(l)}(x^1, x^2, x^3) = \frac{1}{4}(1 + x^1_{(l)} x^1)(1 + x^2_{(l)} x^2)\phi_{(l)}(x^3). \quad (4)$$

Функция $\phi_{(l)}$ определяется из условия линейности распределения температуры в слоях в трансверсальном направлении

$$\phi_{(l)} = \frac{1}{2}[1 - x_l^3 + 2x_l^3 (\sum_{i=1}^{k-1} \frac{h_i - h_{i-1}}{\lambda^i_{33}} + \frac{x^3 - h_{k-1}}{\lambda^k_{33}}) \times (\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i - h_{i-1}}{\lambda^i_{33}})^{-1}], \quad (5)$$

где h_i – толщина i-го слоя.

Функция времени $g(t)$ принимается линейной.

Применяя конечноразностную аппроксимацию частной производной по времени с применением схемы Кранка-Николсона [2] получаем матричное уравнение

$$\left[[H] + \frac{1}{\Delta t}[G]\right]\{T_{n+1}\} = \frac{1}{\Delta t}[G]\frac{1}{\Delta t}\{T_n\} - \{R_n\}, \quad (6)$$

© Г. А. Козуб, 2006

где H, G – матрицы теплопроводности, Δt – шаг по времени, T, R – векторы узловых температур и тепловой нагрузки.

Для решения задач термоупругости используется МКЭ с применением субпараметрических конечных элементов [3], моделирующих свойства слоистого материала из предположения неразрывности поля перемещений точек слоев.

$$u^{(k)} = \sum_{l=1}^{8} \varphi_{(l)}^{(k)\pm}(x^1, x^2, x^3) u_{(l)}^{(k)\pm}, \qquad (7)$$

где $u_{(l)}^{(k)\pm}$ – вектор перемещений узловых точек k-го слоя КЭ,

$$\varphi_{(l)}^{(k)\pm} \frac{1}{4}(1 + x_{(l)}^1 x^1)(1 + x_{(l)}^2 x^2)\chi_{(l)}^{(k)\pm}(x^3). \qquad (8)$$

Причем для k-го слоя аппроксимация перемещений осуществляется с помощью функции

$$\chi_{(l)}^{(k)\pm} = \frac{\left(\pm x^3 \mp x_{(l)}^{3(k)\mp}\right)}{h_k}, \qquad (9)$$

Исходя из закона сохранения энергии, вариационное уравнение термоупругости Био как обобщение вариационного принципа Лагранжа имеет вид [1, 2]

$$\iiint_{V_k} \delta F dx^1 dx^2 dx^3 - \iiint_{V_k} \vec{P}\delta\vec{u} dx^1 dx^2 dx^3 - \iint_{S_k} \vec{q}\delta\vec{u} ds = 0. \qquad (10)$$

Вариация свободной энергии δF вычисляется по формуле

$$\delta F = \delta W - \sigma_{(т)}^{ij} \delta\varepsilon_{ij}, \qquad (11)$$

здесь $\delta W = \sigma^{ij}\delta\varepsilon_{ij}$ – вариация упругой энергии деформации.

Использование конечноэлементной аппроксимации позволяет получить матричное уравнение на каждом временном шаге в виде

$$[K]\{u\} = \{R\}, \qquad (12)$$

где K – матрица жесткости, u – вектор узловых перемещений, R – вектор узловых нагрузок, обусловленных действием механических и тепловых нагрузок.

В рамках рассмотренного подхода решен ряд задач.

Задача 1. Нестационарная одномерная задача теплопроводности для составной области. Данный пример рассмотрен в [4]. Толщины слоев h_k = (1/3; 1/3; 1/3)h, где h = 6 см – общая толщина пакета. Теплофизические характеристики: $\lambda^{(k)}$ = (34,5; 202; 65,6)Вт/(м·К); $\rho^{(k)}$= (11340; 2700, 7400)кг/м^3; $c_p^{(k)}$ = (129,9; 758,4; 226,3)Дж/(кг·К) (k = 1, 2, 3). Начальная температура пакета 0 °С. В момент времени t = 0 температура нижней поверхности (x_3 = 0) повышается от 0 до 400 °С и поддерживается такой на протяжении всего процесса. На рис. 1. дано распределение температуры по толщине пакета в момент времени t. Конечно-элементное решение, полученное на основе трехмерных КЭ, практически совпадает с аналитическим, приведенным в 4]. Погрешность не превышает 1,5 %, поэтому результаты представлены одной кривой. Кривые 1, 2, 3 соответствуют распределению температуры при $t = 8\cdot10^{-4}$, $50\cdot10^{-4}$, 1 (с).

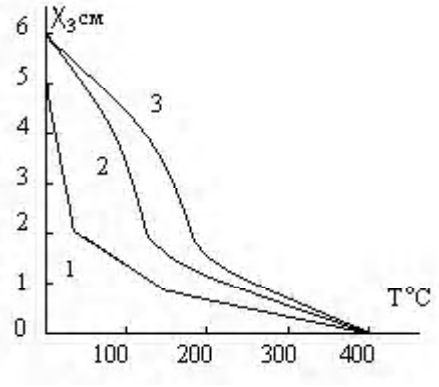


Рис. 1.

Задача 2. Нестационарная задача теплопроводности для двухслойного цилиндра при сложном температурном нагружении. Рассмотрим двухслойный цилиндр с толщиной слоев $h^{(k)}$ = (2/3, 1/3)h, где h = 0,3 см – общая толщина пакета. Начальная температура – 20 °С. Теплофизические характеристики следующие: $\lambda^{(k)}$ = (2, 23,3)Вт/(м·К); $\rho c_p^{(k)}$ = (2,0, 4,413)·10^6 Дж/(м^3·К). Со стороны наружной поверхности температура окружающей среды меняется по закону T = 500·(1+0,1cosφ) °С. Внутренняя поверхность цилиндра и торец x_2 = 10 см теплоизолированы, а на торце x_2 = 0 задан конвективный теплообмен с окружающей средой θ = 300 °С. Коэффициенты теплоотдачи на наружной и торцевой (x_2 = 0) поверхностях приняты одинаковыми и равными 1000 Вт/(м^2·К).

Необходимо отметить, что в научной литературе практически отсутствуют точные решения нестационарных задач теплопроводности для слоистых композитных систем, полученные с помощью аналитических методов. Поэтому для сравнения были взяты результаты решения этой задачи, полученные с помощью полуаналитического метода конечных элементов [5].

При решении применялась неявная схема дискретизации по времени с шагом Δt = 0,2 с. Распределение температуры по внутренней и внешней поверхности цилиндра вдоль образующей для сечения φ =180 ° при t = 10 с приведено на рис. 2 (сплошная кривая). Результаты, полученные на основе предлагаемого подхода, достаточно хорошо согласуются с решением [5] (штрих-пунктирная кривая).

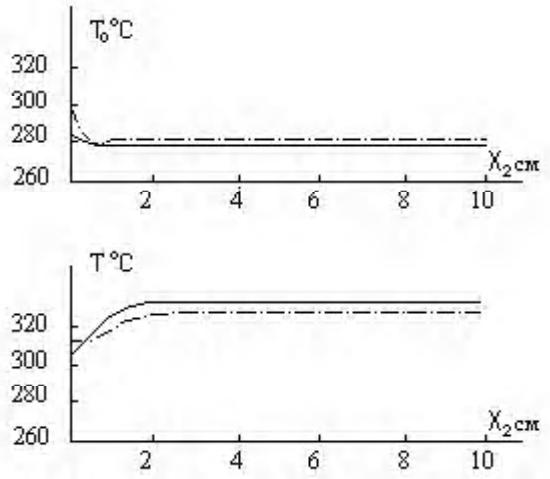


Рис. 2.

Задача 3. Задача термоупругости для цилиндра (L = 2 м; R = 4 м; h = 0,4 м) трехслойной структуры из термочувствительных материалов. Торцы оболочки жестко защемлены. Зависимость характеристик материала слоев от температуры аппроксимируется линейными функциями

$$E_r^{(k)} = \overline{E}_r^{(k)}\left(1 + F_r^{(k)}T^{(k)}\right),$$
$$G_{12}^{(k)} = \overline{G}_{12}^{(k)}\left(1 + F_3^{(k)}T^{(k)}\right),\ (r = 1,2),$$
$$G_{r3}^{(k)} = \overline{G}_{r3}^{(k)}\left(1 + F_{r+3}^{(k)}T^{(k)}\right),$$
$$\alpha_{mm}^{(k)} = \overline{\alpha}_{mm}^{(k)}\left(1 + F_{m+5}^{(k)}T^{(k)}\right),\ (m = 1...3),$$

где $F_p^{(k)}$ – постоянные, определяемые экспериментально.

Толщины слоев $h^{(k)} = (0{,}025; 0{,}35\ 0{,}025)$ м. Характеристики внешних слоев (k = 1,3) не зависят от температуры ($E^{(1)} = E^{(3)} = 7\cdot10^4$ МПа; $\nu^{(1)} = \nu^{(3)} = 0{,}3$; $\alpha^{(1)} = \alpha^{(3)} = 22{,}4\cdot10^{-6}$ K^{-1}). Характеристики внутреннего термочувствительного слоя $(\overline{E}_1^{(2)}; \overline{E}_2^{(2)}) = (1{,}704; 2{,}808)10^4$ МПа; $\nu_{21} = 0{,}106$; $\alpha_{33} = 0$; $(\overline{\alpha}_{11}; \overline{\alpha}_{22}) = (1{,}134; 1{,}418)10^{-5}$ K^{-1}; $\nu_{21} = 0{,}106$; $F_p = -2{,}5\cdot10^{-3}$ K^{-1} (p = 1-5); $F_6 = -2{,}413\cdot10^{-8}$K^{-1}; $F_7 = F_8 = -2{,}445\cdot10^{-8}$K^{-1}. Температурное поле изменяется по закону

$$T^{(k)} = (1000 - 375x_1)x_3 - 75x_1 + 100 \qquad (°C).$$

Результаты решения задачи на основе описанного подхода представлены в табл.1 в виде нормальных перемещений на уровне срединной поверхности. Для сравнения в таблице приведены данные работы [6], полученные на основе прикладной теории, реализованной методом дискретной ортогонализации. Анализ результатов показывает, что применение предложенной методики позволяет получать удовлетворительные решения.

Таблица 1

x_1, м	Решение	$10^3 \cdot u_3$, м		
		$E_1^{(2)}/G_{12}^{(2)}$		
		10	100	300
0,3	МКЭ	0,984	1,485	1,531
	[6]	0,968	1,409	1,470
0,6	МКЭ	1,443	2,551	2,834
	[6]	1,439	2,508	2,741
1,0	МКЭ	1,011	1,756	2,023
	[6]	1,021	1,772	1,890
1,5	МКЭ	0,59	-0,139	-0,263
	[6]	0,071	-0,169	0,316

Заключение

Разработанная методика, основанная на использовании тремерных конечных элементов, позволяет проводить расчет реальных слоистых конструкций на тепловые нагрузки, в том числе с учетом термочувствительности материала слоев. При этом удается избежать применения упрощающих гипотез, сводящих трехмерную задачу к плоской постановке.

Список литературы

1. Киричевский В.В., Сахаров А.С. Нелинейные задачи термомеханики конструкций из слабосжимаемых эластомеров. – К.: Будівельник, 1992. – 216с.
2. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе “МІРЕЛА+” // Под общ.ред. Киричевского В.В. – К.: Наук.думка, 2005. – 403с.
3. Киричевский В.В., Козуб Г.А., Дохняк Б.М. Построение матрицы жесткости конструкций из анизотропных материалов для задач термоупругости // “Вестник ВУНУ”, Луганск: ВУНУ им. Даля, №3(97), 2006. – С. 59-66.
4. Mikhailov M. D., Oziscr M. N., Vulchanov N. L. Diffusion in composite layers with automatic solution of the eigenvalue problem // J. of Hear and Mass Transfer – 1983. – Vol. 11, № 8. – P. 1131-1141.
5. Савченко В.Г. Исследование нестационарных температурных полей в телах вращения при неосесимметричном нагреве // Пробл. проч. – 1982. – №1. – С. 33-36.
6. Рассказов А.О., Соколовская И.И., Шульга Н.А. Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек. – К.: КАДИ, 1986. – 191с.

Одержано 14.09.2006

У статті запропоновано математичну модель поводження шаруватого матеріалу для розв’язання нестаціонарних задач термопружності на основі методу скінчених елементів. Алгоритм розв’язання нестаціонарних задач оснований на використанні неявної схеми дискретизації за часом.

The mathematical model of layered material behaviour for nonstationary thermo- elastisity problem solving based on finite elements method was offerred. The algorithm of nonstationary problem solving is based on using of uneven scheme of discretization in time.

V МЕХАНІЗАЦІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТИЗАЦІЯ

УДК: 629.014.8

Д-р техн. наук А. Д. Омельченко[1], д-р техн. наук Г. Ф. Бабушкин[2]

[1] Университет экономики и технологии транспорта, г. Киев
[2] Национальный технический университет, г. Запорожье

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА, СОЗДАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫХ МАГНИТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Приведены критерии перспективности и основные факторы, которые влияют на выбор магнитного транспорта. Обоснованы перспективные принципы устройств и технологии транспортирования твердых грузов под влиянием магнитных полей. Составлена математическая модель выбора вида магнитного транспорта.

Учеными и специалистами ряда научно-исследовательских и проектных организаций страны завершена разработка основных положений Комплексной программы дальнейшего развития непрерывных и новых специализированных видов транспорта на перспективу. В ней определены первоочередные и перспективные направления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, мероприятия по укреплению и развитию материально-технической базы этих видов транспорта. Работа выполнялась в соответствии с постановлением Совета Министров УССР № 524 от 02.12.82 г. "О расширении научных исследований и ускорения внедрения в практику разработок вузов…".

Еще недавно казалось, что проблема создания эффективной транспортной системы может быть решена только техническими средствами. Однако время показало, что транспорт сегодня – это сложнейшая система, устаревших и новых транспортных средств. Если в области совершенствования существующих транспортных машин выполняется большая работа и имеются значительные достижения, то поиски, направленные на создание принципиально новых транспортных устройств, ведутся еще не достаточно широко. Проведенный анализ показал, что существующие конструкции транспортных систем не удовлетворяют растущим требованиям их эксплуатации [1, 2, 4, 5].

Наряду с развитием и совершенствованием технических средств транспорта, технологии и организации перевозок следует считать целесообразным проведение поисковых работ, направленных на создание принципиально новых видов транспортных средств на базе современных достижений техники и физики с целью качественного улучшения эксплуатационных характеристик, открытию путей коренного усовершенствования техники. Решение этих задач требует глубокого осмысливания роли транспорта в современном обществе, выработки концепции его анализа в увязке с основными тенденциями развития народного хозяйства, использования достижений различных отраслей науки при создании транспортных средств и технологических процессов [8].

Магнитное транспортирование – это проблема сегодняшней и завтрашней промышленности и транспорта, передний край науки и техники.

Задача выбора вида магнитного транспорта для грузовых перевозок ставится как задача исследования рынка. Спрос определяется потенциальным способом в перевозках из пункта *A* в пункт *B*. Предложения исходят от видов транспорта, обслуживающих перевозки между этими пунктами: магнитного железнодорожного, магнитно-ленточного, магнитно-пластинчатого, магнитно-подвесного, магнитно-винтового, магнитно-роликового, магнитно-конвейерного поезда, магнитно-соленоидного (трубопроводного) [2-8].

Равновесие между спросом и предложением осуществляется в соответствии с экономическими критериями (ценой груза, стоимостью перевозки), ограничениями (наличием железнодорожного узла, конечного пункта трубопровода), ограничительными условиями (тарифами, запретами на движение отдельных видов транспорта).

Важнейшие требования, предъявляемые к выбору вида транспорта (в том числе магнитного) сегодня зависят: а) по критерию скорости доставки грузов (пассажиров), роста объемов перевозок (комплексный критерий) – в неуклонном повышении скорости доставки грузов (повышение грузооборота при увеличении скорости движения, увеличение производительности); если скорость транспорта не увеличивается, то этот фактор нарушает закон непрерывного развития транс-

© А. Д. Омельченко, Г. Ф. Бабушкин, 2006

портных средств, указывает на то, что возможности модернизации этого вида себя исчерпали и надо ожидать качественных изменений; в соответствии с диалектикой развития транспорта не должно быть разрыва в скоростях между его различными видами; если возникает пустующий интервал скоростей, то следует ожидать появления качественно нового вида транспорта с диапазоном скоростей, заполняющим этот интервал; достижение высоких скоростей, например, подвижного состава на железнодорожном транспорте постепенно приводит к тому, что колесо – одно из старейших изобретений человечества, оказывается на грани использования его возможностей и служит препятствием для нового роста скоростей движения на земле; б) по критерию экономичности – в эффективности обеспечения срока службы машины, наименьших габаритов, затрат труда и материально-денежных средств; требования к экономичности транспортных средств все более повышается и часто становится определяющим; в) по критерию внедрения стандартизации и унификации – в создании стандартных деталей, простейших конфигураций, сборочных единиц, комплектов и комплексов; г) по критерию обеспечения безопасности действия и обслуживания – в повышении качества, надежности и долговечности, осуществление компактности; д) по критерию экологической чистоты – в улучшении внешнего вида и привлекательности формы; жизнь давно привела нас к необходимости создавать единые системы “человек-машина-среда”, а мы по прежнему конструируем отдельные машины.

Однако, основными факторами, влияющими на выбор вида транспорта, являются стоимость перевозки, время и качество обслуживания [1].

Выбор вида транспорта по критерию стоимости перевозок

Стоимость транспортирования груза из пункта *A* в пункт *B* включает стоимость доставки от места производства до места отправления в пункте *A*; стоимость транспортирования между местом отправления в пункте *A* и назначения в пункте *B*; стоимость доставки от пункта назначения *B* до места потребления в пункте *B*.

Стоимость перевозки устанавливается в соответствии с тарифами для каждого вида транспорта в зависимости от рода, объема и массы перевозимых грузов и расстояния транспортирования; необходимо учитывать дополнительные расходы и условия: возможность загрузки транспорта в обратном направлении, объемы и регулярность перевозок.

Выбор вида транспорта по критерию времени

Время транспортирования включает составляющие, аналогичные составляющим стоимости; необходимо учитывать среднее время при перевалке с одного вида транспорта и транспортного средства на другой; время сбора, сортировки, погрузки при отправлении и смене транспорта, время ожидания, разгрузки, распределения и приеме грузов должно оцениваться для каждого вида транспорта по видам транспортируемых грузов; необходимо иметь ввиду административные задержки; при расчете времени надо учитывать частоту для каждого вида регулярного прямого сообщения, так как независимо от времени приема груза к отправлению он должен ожидать час (день) отправления транспортного средства по расписанию; следует учитывать и другие особенности.

Выбор вида транспорта по критерию качества обслуживания

Качество обслуживания характеризуется частотой движения, пропускной способности, сохранностью, безопасностью, числом перевалок с одного вида транспорта на другой; частота движения связана со спросом на транспортирование по данной линии (чем выше спрос, тем больше частота движения); если пропускная способность какого-то пункта низкая, то это увеличивает время транспортирования и может привести к необходимости использования более дорогостоящего, более быстрого вида транспорта; учет такого фактора, как сохранность, особенно важен при выборе вида транспорта для дорогостоящих грузов.

Регулярность движения выбираемого вида транспорта позволяет заключить договор, обеспечивающий клиенту регулярность снабжения.

Анализ публикаций и задачи исследования

Проведенный анализ показал, что существующие конструкции транспортных систем не удовлетворяют растущим требования их эксплуатации. В связи с этим рассматриваемые в работе проблемы магнитного транспортирования твердых грузов являются актуальными [4, 5, 8]. Уже сегодня для многих установок можно с уверенностью назвать ряд преимуществ магнитных транспортных систем перед обычными, а именно:

- отсутствие механических передач (редуктора, предназначенного для изменения скорости и преобразования вращательного движения в линейное; изнашивающихся муфт, валов, шестерен, цепей и подшипников);
- отсутствие механического контакта между взаимно перемещающимися частями и вызываемого им износа;
- отсутствие движущихся частей либо всей установки, либо привода;
- отсутствие ограничений по сцеплению и потерь в передаче; механического контакта между взаимно перемещающимися частями; вращающихся частей;
- низкие эксплуатационные расходы и высокий срок службы;
- возможность полной изоляции транспортируемого груза от внешней среды;
- движение груза по сложным пространственным трассам;

- надежность устройств; нетребовательность к уходу;
- простота схемы управления;
- отсутствие загрязнения воздуха, бесшумность работы двигателей и ряд других преимуществ, отмеченных в работе при рассмотрении конкретных устройств.

При рыночных отношениях магнитные методы транспортирования получат мировое распространение, т. к. они обладают лучшими показателями (параметрами) по сравнению с существующими видами транспорта.

Решение задачи

Исходя из вышеизложенного, определено направление исследования, а именно: исследование и разработка теоретических основ, принципов, устройств и технологий транспортирования твердых грузов с непосредственным и косвенным воздействием магнитных полей.

По тематике работа является составной частью цикла исследований магнитных транспортных устройств и носит характер дальнего поиска.

По отношению к работам предшественников настоящее исследование следует рассматривать как очередной этап, посвященный переходу от изучения законов движения единичного тела к законам движения насыпного груза. Одним из возможных путей качественного изменения в процессах транспорта является отказ от существующих принципов структурного построения транспортных машин и создания установок, в которых механические способы воздействия на транспортируемый материал либо устраняют полностью, либо роль их сводится к минимуму. В этом смысле известной универсальностью обладает магнитное поле, поскольку оно обеспечивает непосредственное воздействие на транспортируемый материал с магнитными и электромагнитными свойствами или на грузонесущий орган, которому сообщены соответствующие физические свойства. Чисто магнитная силовая связь по своей природе механически не уязвима.

Магнитное транспортирование твердых грузов актуально и представляет собой новое научное направление в промышленном транспорте, связанное с практическим применением стационарных и движущихся магнитных полей. Магнитное транспортирование – это проблема сегодняшней и завтрашней промышленности и транспорта, передний край науки и техники. Разработка принципа действия нового магнитного транспортного устройства шло и идет в одном из двух направлений: конструктивная преемственность или научный поиск новых принципов.

По способу передачи перемещаемому грузу движущей силы магнитные транспортные устройства разделяются на две основные группы: с непосредственным и косвенным воздействием магнитных полей (стационарных или движущихся), которые могут быть созданы, как электрическими так и постоянными магнитами.

Система электрических магнитов позволяет получить перемещение магнитного поля четырех видов: вращающиеся, движущихся поступательно, спирально-бегущего, и спирально-движущегося.

Поступательно-движущееся поле создается цилиндрическими или плоскими индукторами путем питания их обмоток: трехфазным синусоидальным, трехфазным синусоидальным однополупериодно выпрямляемым, трехфазным импульсным, шестифазным импульсным токами.

Исследования показали, что для транспортирования насыпных ферромагнитных грузов необходимо применять токи пониженной частоты с использованием либо магнитных преобразователей частоты, либо с помощью управляемых вентилей тиристоров.

Актуальность избранного направления исследования определена тесной связью его с планами развития народного хозяйства страны в соответствии с основными направлениями развития отраслей промышленности.

Для реализации намеченных заданий министерства разрабатывают схемы развития и размещения непрерывных и новых специализированных видов транспорта по отраслям промышленности.

В связи с изложенным развитие теоретических основ и создание оптимального магнитного транспортного оборудования и их элементов представляется важной задачей, актуальной для промышленного транспорта многих отраслей промышленности.

А. Модель выбора вида магнитного транспорта представляет собой систему уравнений, которая соответствует каждому виду транспорта и определяет долю его перевозок в общем грузопотоке. Уравнение для выбора вида транспорта имеют форму:

$W_{мж} = F_{мж}(d_{мж}, S_{мж}, q_{мж})$ – для магнитного железнодорожного транспорта;

$W_{мл} = F_{мл}(d_{мл}, S_{мл}, q_{мл})$ – для магнитно-ленточных конвейеров;

$W_{мп} = F_{мп}(d_{мп}, S_{мп}, q_{мп})$ – для магнитно-пластинчатых конвейеров;

$W_{мv} = F_{мv}(d_{мv}, S_{мv}, q_{мv})$ – для магнитно-винтовых конвейеров;

$W_{мр} = F_{мр}(d_{мр}, S_{мр}, q_{мр})$ – для магнитно-роликовых конвейеров;

$W_{мкп} = F_{мкп}(d_{мкп}, S_{мкп}, q_{мкп})$ – для магнитно-конвейерных поездов;

$W_{мс} = F_{мс}(d_{мс}, S_{мс}, q_{мс})$ – для магнитных солеподных конвейеров.

$W_{мж}$, $W_{мл}$, $W_{мп}$, $W_{мv}$, $W_{мр}$, $W_{мкп}$, $W_{мс}$ – определяют долю перевозок соответственно магнитного железнодорожного транспорта, магнитно-ленточного,

магнитно-пластинчатого, магнитно-винтового, магнитно-роликового конвейеров, магнитно-конвейерных поездов, магнитных солепоидного конвейера.

Независимой переменной в этих уравнениях $d_{мж}$, $d_{мл}$, $d_{мп}$, $d_{мv}$, $d_{мр}$, $d_{мкп}$, $d_{мс}$ представляют расстояние для каждого вида транспорта (магнитного железнодорожного транспорта, магнитно-ленточного, магнитно-пластинчатого, магнитно-винтового, магнитно-роликового конвейеров, магнитно-конвейерных поездов, магнитных солепоидного конвейера соответственно) между пунктами A и B.

$S_{мж}$, $S_{мл}$, $S_{мп}$, $S_{мv}$, $S_{мр}$, $S_{мкп}$, $S_{мс}$ – стоимость перевозок для каждого вида транспорта из пункта A в пункт B.

$q_{мж}$, $q_{мл}$, $q_{мп}$, $q_{мv}$, $q_{мр}$, $q_{мкп}$, $q_{мс}$ – качество обслуживания на видах транспорта [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Б. Использование модели выбора вида транспорта в модели прогнозирования спроса на транспорт

Структурная схема расчета спроса на транспортирование грузов, в котором используются модели выбора вида транспорта, показана на рис. 1. Расчет осуществляется в шесть этапов (см. рис. 1, позиции 1-6). На схеме показан 6-й этап, где производится сравнение спроса выше возможностей данного вида транспорта, то необходимо перераспределять грузопотоки.

Результаты расчета представляются в виде годовых и ежедневных грузопотоков для различных транспортных сетей. Спрос на магнитный железнодорожный транспорт выражается в количестве тонн грузоподъемности и числе вагонов в расчете на один год и на один день для каждой из больших железнодорожных магистралей.

Модели выбора вида транспорта используют и при планировании развития транспорта.

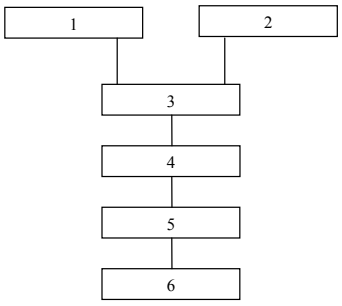


Рис. 1. Структурная схема расчета спроса на транспортирование грузов:

1 – определение грузопотока, зарождающего в зоне *i* в направлении остальных зон; 2 – определение грузопотока, направляемого в зону *j* из всех остальных зон; 3 – определение грузопотока между зоной производства *i* зоной потребления *j*; 4 – выбор вида транспорта на основе вышеизложенной модели и распределение грузопотока из зоны *i* в зону *j* между видами транспорта; 5 – распределение грузовых перевозок из *i* в *j* внутри каждого вида транспорта, определение спроса на каждый вид транспорта; 6 – сравнение спроса на вид транспорта с его пропускной способностью

В последние годы на транспорте значительно возросли грузовые перевозки автомобильным транспортом. [1]. Все это уменьшает долю перевозок по железной дороге. Энергетический кризис с его социальными и политическими последствиями усложняет проблему выбора транспорта, поэтому модель выбора становится очень важной для специалистов по планированию. Изучения влияния различных факторов на выбор способа транспортирования дает возможность определить тарифы, ограничительные предписания и сферу первоочередного приложения достижения науки и техники, позволяющие уравновесить распределение перевозок между видами транспорта, что облегчает принятие решений.

Так, следует отметить, что передовые государства направляют усилия на уменьшение потребление энергии транспортной отраслью. Это объясняется тем, что транспорт потребляет 25 % всей производимой в стране энергии и 50 % нефтепродуктов, используемых для производства энергии.[1].

Как показали исследования, потребление энергии транспортом увеличивалось в среднем на 3,2 % в год.[1]. Для транспортирования равного количества груза затраты энергии на трубопроводном или железнодорожном транспорте почти равны. Однако на автомобильном транспорте расходы энергии в 4 раза больше. Поэтому программа строительства автомобильных дорог сокращается в то время, как финансовая помощь железнодорожным компаниям увеличивается. Для исследований и расчета прибыльности, убыточности и нового распределения перевозок используют указанные модели прогнозирования грузовых перевозок и выбора вида транспортирования. Модель планирования грузовых перевозок изображена на рис. 2.

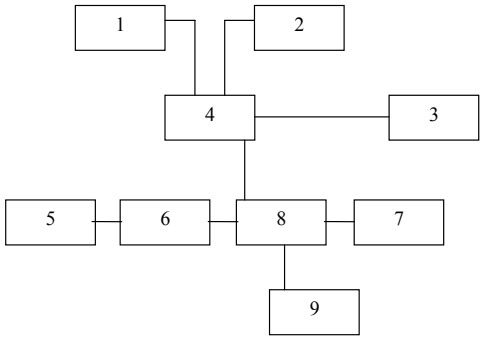


Рис. 2. Модель планирования грузовых перевозок:

1 – матрица грузопотоков в отчетном году; 2 – транспортные сети; 3 – уравнение времени и стоимости перевозок различными видами транспорта; 4 – выверка модели выбора вида транспорта; 5 – оценка спроса на перевозку груза; 6 – расчет предполагаемого спроса на грузовые перевозки всеми видами транспорта; 7 – программы развития транспортных сетей; 8 – модель выбора между видами грузового транспорта; 9 – оценка наилучших планов грузовых перевозок

Выводы

1. Исследования показали, что перспективность любого вида транспорта, в том числе и магнитного, зависят от критериев прогрессивности – скорость, экономичность, грузооборот, безопасность, надежность, долговечность, блочность, проходимость, экономические воздействия, политичность, социальность и комфортность.

2. Выделены основные факторы, влияющие на выбор вида магнитного транспорта – стоимость перевозки, время и качественность обслуживания.

3. На основании современной теории рассмотрены и углублены существующие представления о магнитных методах транспортирования в зависимости от объекта, на который воздействуют поля: чисто магнитный, чисто электрический и электромагнитный.

4. Обоснованы изыскания и описания перспективных приемов и решений:

1) исследования и разработки физических основ, принципов, устройств и технологии транспортирования твердых грузов с непосредственным воздействием магнитных полей, а именно:

- стационарных постоянных магнитов и электромагнитов в рабочей зоне для подмагничивания транспортируемого груза: в ленточных конвейерах с многополюсными магнитными системами и лыжами; магнитных барабанах; магнитно-винтовых конвейерах;

- поступательно движущихся, созданных синусоидальным трехфазным током, однополупериодно выпрямленным трехфазным током, выпрямленным импульсным трехфазным и шестифазным токами: в коаксиально-линейных индукторах соленоидных конвейеров;

- вращающихся магнитных систем: в магнитно-винтовых конвейерах;

2) исследования и разработки физических основ, принципов, устройств и технологий транспортирования твердых грузов с косвенным воздействием магнитных полей, а именно:

- магнитных промежуточных приводов транспортных установок с движущими частями: в ленточных и пластинчатых конвейерах; электромагнитных промежуточных приводов транспортных установок без движущихся частей: в ленточных и пластинчатых конвейерах;

- магнитных приводных барабанов: в ленточных конвейерах;

3) исследование современного состояния в области разработок линейных двигателей для целей транспорта, а именно:

- типология, т.е. классификация, предоставляющая соотношения между различными типами магнитных транспортных устройств;

- эволюция их развития, т.е. процесс постепенного, непрерывного количественного изменения, подготавливающий качественные изменения.

5. Составлена модель выбора вида магнитного транспорта – система уравнений, которые соответствуют каждому виду транспорта и определяют долю его перевозок в общем грузопотоке.

6. Обосновано использование выбора вида магнитного транспорта в модели прогнозирования спроса на транспорт.

Список литературы

1. Ben – Bonanah Jacgues, Bourgel Yves. Le choix du mode pour les transports interurbains de merchandises. “Transports” (France), 1976, 216, 420-426 (франц., рез., англ.)
2. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: Учебное пособие для машиностроительных вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.
3. Эсауленко В.А., Омельченко А.Д., О характере движения насыпных грузов в соленоидном конвейере – В кн.: Горные строительные машины и дорожные машины. – Киев: Техника, 1969, вып. 8. – С. 111-113.
4. Начало магнитного транспорта /Под общ. ред. проф. В. Гейера. – М.: Недра, 1966. – 176 с.
5. Штокман И.Г. Основы создания магнитных транспортных установок. – М.: Недра, 1972. – 192 с.
6. Тара и упаковка. Справочник / Каплун Ф.Ш., Галле А.Г., Ноздрин А.А., Цапенко Н.М. – М.: Транспорт, 1972. – 528 с.
7. Гриневич Г.П. Комплексная механизация и автоматизация погрузо-разгрузочных работ на железнодорожном транспорте. – М.: Транспорт, 1982. – 255 с.
8. Лившиц В.Н. Системный анализ экономических процессов на транспорте. – М.: Транспорт, 1986. – 240 с.

Одержано 21.09.2006

Наведено критерії перспективності та основні фактори, що впливають на вибір магнітного транспорту. Обґрунтовано перспективні принципи пристроїв та технології транспортування твердих вантажів під впливом магнітних полів. Складена математична модель вибору виду магнітного транспорту.

The criterion of perspectiveness and main factors which influence on magnet transport choice were shown. The perspective principles of devices and technology of hard cargo transportation under magnet fields influence were developed. The mathematical model of magnet transport type choice was created.

УДК 629.017

Канд. техн. наук О. М. Артюх

Національний технічний університет, м. Запоріжжя

НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

На підставі аналізу достоїнств та недоліків систем технічного обслуговування й ремонту автотранспортних засобів запропоновано комплекс заходів щодо вдосконалення процесів технічної експлуатації засобів транспорту на основі сучасних інформаційних технологій.

Вдосконалення системи організації та управління процесами технічного обслуговування (ТО) транспортних засобів є одним з основних напрямків підвищення ефективності роботи системи сервісу та якості ТО обслуговуваного автотранспорту. Це обумовлюється високим темпом зростання об'ємів виконуваних робіт, суттєвою складністю конструкцій сучасних автомобілів та різноманітністю впровадження нових стратегій ТО і методів діагностування [1]; значним збільшенням потоків технічної та виробничо-економічної інформації, необхідної для управління виробництвом.

Обсяг і характер задач, які ставляться перед автотранспортними підприємствами України, потребують не часткових покращень, а великих комплексних заходів, котрі б дозволили перейти на якісно новий рівень розвитку. Значне ускладнення конструкцій вузлів та агрегатів сучасних транспортних засобів, збільшення виконуваних ними функцій, більш навантажені режими роботи вузлів, агрегатів тощо – суттєво загострило проблему безпеки руху транспорту, що в значній мірі обумовлюється якістю управління процесами технічної експлуатації автотранспортних засобів.

Нагальна потреба вдосконалення процесів управління технічною експлуатацією обумовлена зміною технічного стану об'єктів автомобільного транспорту і вимогами підтримання в працездатному стані транспортних засобів у процесі експлуатації, впливом великої кількості різних соціальних та економічних факторів при виробленні керуючих впливів, зменшенням відведеного часу для обробки інформації та ін.

Характерною рисою структури сучасних автопарків країн СНД, у першу чергу таких країн, як Україна, Росія, Білорусь – є велика питома вага транспортних засобів, що не відповідають у повному обсязі міжнародним вимогам за технічним рівнем і безпекою конструкції, мають тривалі терміни експлуатації, в тому числі за межами встановленого ресурсу, а також низьку технічну надійність.

У сформованій ситуації наявність сучасних методик діагностування, надійного діагностичного обладнання є головною умовою для перевірки технічного стану, і якщо буде потреба проведення якісного обслуговування транспортних засобів, що знаходяться в експлуатації.

Структура й функціональні особливості кожної із систем автомобілів сучасної конструкції, і особливо електронних систем керування, обумовлюють значну тривалість і трудомісткість виявлення їхніх дефектів під час діагностування, високу ймовірність помилок і вартість самого процесу діагностування.

Найважливішим завданням, яке стоїть сьогодні перед транспортними підприємствами на сучасному етапі розвитку науки й техніки, є створення нової інформаційно-діагностичної системи підтримки автотранспортних засобів у працездатному стані на основі сучасних інформаційних технологій (з наступною розробкою державної системи контролю технічного стану рухливого складу й чітким визначенням місця й ролі ДАІ у цій системі).

Створення нової інформаційно-діагностичної системи можливе лише на основі використання прогресивної системи обслуговування і ремонту рухомого складу за фактичним станом. Як показує аналіз спеціальних вітчизняних літературних джерел і технологій діагностики автотранспортних засобів, вивчення закордонного досвіду, планово-попереджувальна система ТО і ремонту транспортних засобів, стосовно до автомобілів сучасних конструкцій, обладнаних системами бортової діагностики, система, ТО і ремонту по фіксованому ресурсу не може забезпечити високої надійності автомобіля й не дозволяє мінімізувати витрати на їхню підтримку у працездатному стані [2-5].

Система ППР лише періодично корегується на основі накопиченого досвіду та аналізу статистичної інформації про відмови через пошкодження та дефекти, що виникають у вузлах та агрегатах транспортних засобів під час експлуатації. Становище погіршується недостатньою точністю визначення надійності транспортних засобів. У системі ППР визначення обсягів та періодичності робіт при технічному обслуговуванні та ремонті ґрунтується на середньостатистичних показниках надійності вузлів та агрегатів транспортних засобів.

© О. М. Артюх, 2006

Система ППР передбачає можливість як відмов під час експлуатації, так і передчасних ремонтів, а також навпаки невчасного виявлення перевідмовного стану, оскільки реальні показники надійності окремих вузлів та агрегатів у залежності від умов експлуатації можуть значно відрізнятися від середньостатистичних.

Створення нової гнучкої системи, яка враховувала б "вікові" групи транспортних засобів, умови їх експлуатації, а відповідно і витрати ресурсів усіх видів, та час виконання ТО, має забезпечуватися на уніфікованому поєднанні бортових систем діагностування зі стаціонарними засобами діагностики.

Концепція технічного обслуговування і ремонту рухомого складу за фактичним технічним станом має грунтуватися на використанні автоматизованих комплексних діагностичних систем: вбудованих (бортових) та зовнішніх (стаціонарних). За допомогою цих систем забезпечується безперервний періодичний та неруйнівний контроль, діагностування елементів вузлів і агрегатів та прогнозування їх залишкового ресурсу. При цьому накопичується та аналізується інформація що характеризує технічний стан вузлів та елементів транспортних засобів, які підлягають контролю. Зібрана інформація може передаватися в базу даних діагностики на зберігання або на обробку, результати якої вивчаються спеціалістами, що приймають рішення стосовно технічного стану транспортного засобу.

Це означає, що надалі обов'язковою умовою має стати накопичення інформації про стан вузлів та агрегатів конкретного транспортного засобу. Займатися цим мусять дилерські станції технічного обслуговування, АТП, які ведуть облік інформації про технічний стан обслуговуваних автомобілів.

Результати досліджень після відповідної математичної обробки дозволяють отримати характеристики об'єкту спостереження, які в свою чергу відображатимуть його стан та допоможуть визначити час проведення ТО, скорегувати обсяги робіт і визначити оптимальну вартість ремонту. Ці характеристики також допоможуть визначити ресурс транспортного засобу. У разі, коли сумарні витрати на всі види ремонтів та обслуговування перебільшать вартість транспортного засобу, його варто вивести з експлуатації.

За кордоном система контролю та корегування рівня надійності має назву "Condition monitoring". Світовий досвід успішного впровадження багатьма іноземними фірмами обов'язкового діагностування з технічним обслуговуванням та ремонтом за потребою, показує, що при цьому значно підвищується середній наробіток агрегатів без збільшення кількості відмов [2].

Створення автоматизованих інформаційно-керувальних систем – закономірний етап на шляху розвитку та вдосконалення методів та технології управління сучасним виробництвом – ототожнюється на даний час не тільки з автоматизацією окремих функцій управління на базі комп'ютерної техніки, а й з критичним аналізом та вибором принципів побудови системи, визначенням її структури та функцій, розробкою схем прийняття рішень, створенням інформаційної бази управління.

Сам синтез інформаційної структури потребує вибір принципів управління (мети, критеріїв та обмежень роботи різних ланок системи), розподіл функцій між рівнями системи та виборі відповідних схем прийняття рішень, узгодження цілей підсистем різних рівнів та оптимального стимулювання їхньої роботи; розподіл обов'язків та відповідальності; створення контурів прийняття рішень, розподіл виконуваних функцій між працівниками та технічними засобами; вибір комплексу технічних засобів передачі та обробки інформації [7-11].

Таким чином, покращення ефективності технічної експлуатації транспортних засобів можливе лише на основі наукового підходу та проведення широких комплексних досліджень, які включатимуть:

- теоретичні та лабораторні дослідження вивчення фізичних процесів, що протікають при експлуатації транспортного засобу;
- дослідження економічних аспектів технічної експлуатації транспортних засобів;
- теоретичні й експериментальні дослідження розробки й впровадження прогресивних методів технічного обслуговування й ремонту автотранспортних засобів;
- дослідження процесів експлуатації автотранспортних засобів в умовах України;
- теоретичні й експериментальні дослідження по розробки методів діагностування технічного стану автотранспортних засобів;

Комплекс заходів щодо забезпечення ефективності використання автотранспортних засобів має включати:

- розробку вимог до технологічних процесів і методів технічного обслуговування;
- перевірку відповідності контрольних параметрів встановленим вимогам;
- своєчасне встановлення можливих відхилень;
- оперативне усунення відмов та пошкоджень вузлів та агрегатів транспортних засобів шляхом реалізації оптимальних заходів з технічного обслуговування.

Важлива проблема в питанні забезпечення надійності автотранспортних засобів складних функціональних систем у процесі експлуатації зводиться до розгляду надійності технічних систем з урахуванням діяльності робітників та спеціалістів автосервісу, авторемонтних підприємств і своєчасного виконання ними робіт з технічного обслуговування. При аналізі надійності автотранспортного засобу як функціональної системи останню слід розглядати як взаємодію інженерно-технічного персоналу з технічною системою автомобіля разом з цілеспрямованою діяльністю керівників робіт з організації процесів технічного обслуговування.

Отже, підвищення керованості процесів технічної експлуатації автотранспортних засобів, забезпечення

чіткості їх функціонування, можливе лише не тільки з використанням прогресивних методів технічного обслуговування, але і, що дуже важливо, в підвищенні рівня організаційної та технічної культури працівників автотранспортних підприємств, у поєднанні з постійним удосконаленням технології та організації виробництва.

Список літератури

1. Марков О.Д. Організація автосервісу. – Львів: Оріяна-Нова, 1998. – 332 с.
2. Говорущенко Н.Я., Туренко А.Н. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта). – Харькова: РИО ХГАДТУ, 1998. – 474 с.
3. Говорущенко Н.Я. Основные направления развития автомобильного транспорта в XXI веке// Автомобильный транспорт. – Харьков: 2003. – Вып. 13. – С.7-11.
4. Говорущенко Н.Я., Варфоломеев В.Н. Развитие диагностики и технической кибернетики на автомобильном транспорте// Вестник Харьковского национального автомобильно–дорожного университета. – Харьков: ХНАДУ. – 2004. Вып. 24. – С. 46-49.
5. Мельников А.А. Управление техническими объектами автомобилей и тракторов: Системы электроники и автоматики. – М.: Академия, 2003. – 376 с.
6. Висков Д.А., Кадушин А.И., Михайлова Н.Б. Эффективность инвестиций в информационные технологии // Железнодорожный транспорт. – 2003. – № 4. – С. 45-49.
7. Красковский А.Б., Павлов Д.Н. Информационные технологии в обеспечении качества // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 2. – С. 73-76.
8. Дружинин Г.В., Беликов Л.В. Особенности информатики безопасности перевозок// Железнодорожный транспорт. – 2003. – № 11. – С. 36-39.
9. Розенберг Е.Н., Тишкин Е.М. Пути перехода к информационно–управляющим системам // Железнодорожный транспорт. – 2003. – № 11. – С. 14-18.
10. Харина Е.В. Развитие и совершенствование информационного комплекса предприятия// Актуальні проблеми економіки. – 2003. – № 7 (25). – С. 131-138.
11. Мартинишин Я.М. Економічна модель машини та сутність ремонтно-технічного обслуговування// Актуальні проблеми економіки. – 2004. – № 1 (31). – С. 176-181.

Одержано 18.07.2006

На основе анализа достоинств и недостатков систем технического обслуживания и ремонта автотранспортных средств предложен комплекс мер по совершенствованию процессов технической эксплуатации средств транспорта на основе современных информационных технологий.

Based on analysis of merits and demerits of technical service and repair systems for autotransport devices, comlex of propositions for improvement of technical exploitation of autotransport vehicles using modern information technologies was proposed.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ІНФОРМАЦІЯ

УДК 621.789

УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ

Решение задач повышения надежности газотурбинных двигателей (ГТД) на современном этапе осуществляется не только путем создания новых жаропрочных материалов, используемых для изготовления наиболее уязвимых деталей – рабочих лопаток, но и путем разработки новых способов увеличения конструкционной прочности традиционных сплавов.

Работоспособность лопаток первых ступеней турбины, лимитирующая ресурс ГТД, зависит от целого комплекса факторов [1], среди которых ответственная роль отводится значениям таких механических характеристик жаропрочных сплавов, как пластичность, кратковременная, длительная и усталостная прочность в условиях воздействия газовых потоков с экстремальными температурами, т.е. основным составляющим комплекса механических свойств, определяющих уровень конструкционной прочности данных сплавов.

Поскольку изготовление рабочих лопаток для ГТД осуществляется методом литья, то обязательной операцией при этом является термическая обработка литых заготовок, цель которой не только выравнивание химического состава сплава по объему отливок, но и формирование в структуре сплавов выделений частиц упрочняющей γ'-фазы с заданными параметрами. Это достигается путем нагрева отливок до температур гомогенизации и последующего охлаждения с заданной скоростью. Однако, в случае целого ряда жаропрочных высоколегированных сплавов, например, ВЖЛ-12У, ЖС6У, ЖС6Ф, ЧС-70ВИ и др., отличающихся наличием в своей структуре легкоплавких эвтектик, нагрев металла до температур полного растворения первичных выделенийγ'-фазы недопустим, поскольку значение температур гомогенизации у этих сплавов существенно превышают температуры неравновесного солидуса. В противном случае в структуре сплавов происходит оплавление легкоплавких эвтектик и, как следствие, наблюдается резкое ухудшение прочностных характеристик. В результате при практической термообработке подобных сплавов не удается полностью устранить структурную и ликвационную неоднородность в объеме отливок и обеспечить оптимальное сочетание необходимых размеров частиц γ'-фазы и характера их распределения.

Совместными исследованиями сотрудников ЗНТУ и предприятия ОАО “Мотор Січ” был разработан [2] промышленный способ высокотемпературной термоциклической обработки (ВТЦО) жаропрочных сплавов, который существенно ускоряет процессы гомогенизации при температурах, не превышающих температуры оплавления легкоплавких эвтектик. Многочисленными лабораторными и промышленными экспериментами установлено, что применение способа ВТЦО позволяет в 2-3 раза сократить продолжительность процесса термической обработки отливок и обеспечить оптимальную микроструктуру сплавов, чего невозможно достичь при использовании стандартных изотермических режимов. Как следствие повышаются уровни и стабильность таких механических характеристик, как кратковременная и длительная прочность, показатели пластичности (табл. 1, 2).

Таблица 1 – Результаты кратковременных испытаний образцов из сплава ЧС-70ВИ

Температура испытаний, °С	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
20	915…939 934…942	779…788 812…817	5,0…5,8 6,8…7,2	7,0…9,6 8,2…12,7
900	754…761 766…773	700…723 700…720	4,1…6,4 7,6…9,6	8,1…9,8 11,2…15,6

Примечание. В числителе – значения после стандартной изотермической обработки, в знаменателе – после ВТЦО.

Таблица 2 – Результаты длительных испытаний образцов из сплава ЧС-70ВИ

Температура испытаний, °С	Нагрузка, МПа	Время до разрушения, час	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
850	300	561…676 686…980	6,1…6,5 7,9…9,4	8,1…10,9 12,0…15,7
900	250	139…165 198…312	7,7…8,5 9,0…11,3	12,3…15,0 14,0…16,7

Примечание. В числителе – значения после стандартной термообработки, в знаменателе – после ВТЦО.

На рис. 1 приведены результаты высокотемпературных испытаний на усталость гладкошлифованных образцов из сплава ЧС-70ВИ. Из рисунка видно, что термоциклическая гомогенизационная обработка позволяет увеличить усталостную прочность сплава ЧС-70ВИ на 7-10 %. Аналогичные результаты были также получены при испытаниях образцов из сплава ВЖЛ-12У в лаборатории ИПП НАН Украины.

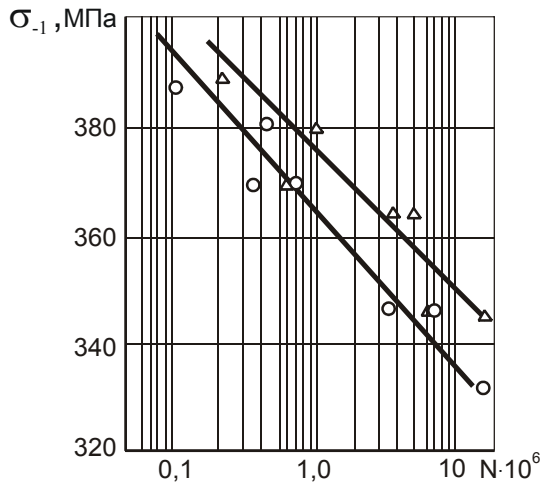


Рис. 1. Кривые усталости образцов из сплава ЧС-70ВИ, испытанных при T = 850 °С:
О – после стандартной термической обработки;
Δ – после ВТЦО

Усталостные испытания лопаток ГТД из сплавов ВЖЛ-12У и ЧС-70ВИ в лабораториях промышленных предприятий позволили установить, что предел выносливости лопаток, подвергнутых ВТЦО, на 8-10 % выше, чем после термообработки по режимам серийного производства.

Расчет экономической выгодности с использованием относительных показателей повышения надежности позволяет установить, что при 10 % роста значений полного ресурса лопатки и ее безотказной работы экономия общих затрат составит 15-18 %. Учитывая суммы текущих годовых издержек при производстве лопаток из жаропрочных дорогостоящих сплавов, экономия для предприятия составит десятки тысяч гривен.

Таким образом, применение высокотемпературной циклической термообработки для сложнолегированных жаропрочных сплавов дает возможность повысить их конструкционную прочность, снизить трудозатраты на изготовление и ремонт двигателей, а также повысить надежность функционирования ГТД.

Список литературы

1. Орлов М.Р. К вопросу о диагностике повреждений лопаток газотурбинных двигателей//Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. – №2. – С. 19-23.
2. Варинская Л.А., Коваль А.Д. Интенсификация процесса термического воздействия на сложнолегированные жаропрочные сплавы с помощью высокотемпературного термоциклирования// Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – №1. – С. 41-45.

© Канд. техн. наук А. С. Лавренко, канд. техн. наук Л. А. Варинская, 2006

Национальный технический университет, г. Запорожье

УДК 621.182

РАЗРАБОТКА ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Эффективным способом индивидуальной зашиты человека от влияния электромагнитных полей является экранирующая одежда.

Продолжительное и систематическое влияние электромагнитных полей на организм человека может приводить к некоторым функциональным изменениям. Эти изменения проявляются в головной боли, нарушении сна, повышенной утомляемости и ряде других симптомов. Кроме того, из-за действия электромагнитных полей отмечается замедление пульса, снижение кровяного давления, изменения в печени и селезенке и других органах.

К защитной одежде предъявляют ряд требований. Она должна обеспечивать снижение интенсивности электромагнитного поля до уровня санитарных норм, не мешать работе бытовых приборов, не снижать производительности работы, быть простой в изготовлении и надежной в эксплуатации.

Анализ состояния вопроса в этой области позволяет сделать вывод о том, что наиболее распространенным материалом для экранирующей одежды являются тканые или вязаные комбинированные полотна с включением в их организованную структуру металлических проволок или неметаллических проводящих нитей. Основным кон-

струкционным материалом для изготовления защитной одежды являются хлопчатобумажные либо хлопчатолавсановые текстильные нити. В качестве волокнистой проводящей фазы текстильных композиционных материалов этого класса в наших работах были предложены тонкие стальные проволоки диаметром 0,03 мм из нержавеющей стали аустенитного класса Х18Н10Т либо углеродные нити, полученные карбонизацией гидратцеллюлозных волокон по определенному режиму химико-термической обработки.

Нами были предложены две группы экранирующих материалов. В первой группе для получения трикотажного полотна использовали металлические проволоки. Во второй группе материалов – в основу и уток тканого экранирующего полотна были введены углеродные нити. Обе группы этих материалов предназначены для повышения эксплуатационной эффективности экранирования и замены ткани из серебряной мишуры, ранее часто применявшейся в защитной одежде ремонтников электрических сетей.

Главной характеристикой защитных материалов является экранирующая способность, определяемая величиной ослабления электромагнитного поля и рассчитываемая по коэффициенту экранирования. Коэффициент экранирования определяли по специальной методике, позволяющей измерить отношение энергии, которую получает образец, при использовании экранирующего материала или без него. На образцах полотен размерами 120×120 мм, закрепляемых между электродами, на которые подается напряжение (8,4 В) от низкочастотного генератора с регулируемой частой 50, 500 и 5000 Гц, проводили измерения напряжения между электродами, включенными в соответствующую электрическую схему.

Большое значение имеет также электросопротивление полученного текстильного композита. Снижение электросопротивления рассматривается как основной способ увеличения стойкости защитного материала к искровым разрядам. Кроме того, важными являются такие эксплуатационные свойства материала, как истираемость, воздухопроницаемость, способность к чистке и ряд других характеристик. Следует учесть, что для постановки на серийное производство необходимо учитывать способность исходных материалов к текстильной переработке на промышленном оборудовании.

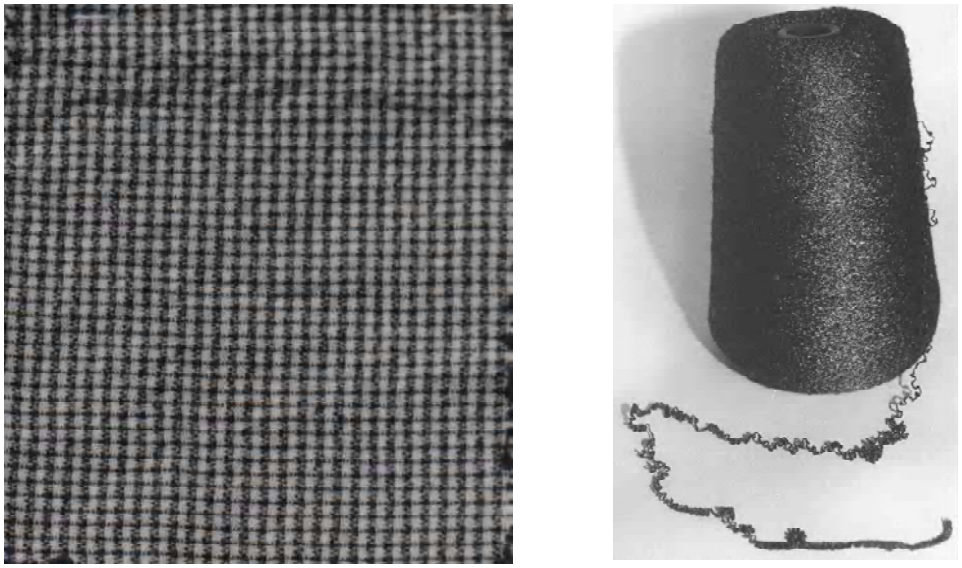
В результате электрических испытаний было установлено, что для материалов первой группы коэффициент экранирования и электрическое сопротивление зависят от структуры металлосодержащего трикотажного полотна и количества стальных проволок в пучке нитей, образующих полотно. Наибольшие значения коэффициента экранирования (до 200) были получены на образцах, изготовленных комбинированным переплетением типа “ластик” на специализированных вязальных машинах 10 и 12 классов. В результате проведенных исследований были предложены составы и структура экранирующих токопроводящих трикотажных полотен и разработана промышленная технология их получения. Из рекомендованных к практическому использованию материалов отметим группу полотен на основе хлопчатобумажной пряжи линейной плотностью 50,8 текс (1 нить) и хлопчатолавсановой пряжи линейной плотностью 16,5 текс (2 нити). Такой комбинированный пучок нитей совместно с проволокой из нержавеющей стали диаметром 0,03 мм (2 проволоки) хорошо перерабатывается на трикотажных плосковязальных машинах типа ПВПЭМ. На эти материалы выпущена нормативно-техническая документация, в соответствии с которой осуществлялись серийные поставки защитных металлотрикотажных полотен предприятиям-изготовителям спецодежды.

В последние годы для средств защиты от электромагнитных излучений в широком диапазоне частот интенсивное развитие получили работы в области создания и использования углеродных волокнистых материалов. Для этих целей используют низкомодульные углеродные волокна из гидратцеллюлозы. В таких волокнах можно создавать требуемый уровень электрофизических свойств за счет целенаправленного влияния на соотношение тонкой структуры углеродного волокна кристаллической и аморфной фаз, получаемых в результате процесса карбонизации гидратцеллюлозы. Обладая высокой эластичностью и износостойкостью, углеродные нити из гидратцеллюлозы хорошо перерабатываются совместно с хлопчатобумажными и синтетическими волокнами в ткани, из которых изготавливают спецодежду.

Нашими исследованиями показано, что в токопроводящих защитных тканях для работы на электроустановках промышленной частоты необходимо использовать углеродные нити с удельным сопротивлением 750-800 Ом/м. Установлено, что между экранирующей способностью материала и характером расположения углеродных нитей в ткани существует определенная зависимость. При оптимизации состава и структуры электропроводящих тканей с целью экономии сырья и снижения трудоемкости были рекомендованы несколько типов тканей, в которых коэффициент экранирования превышал 100. Углеродная нить в этих тканях расположена как в основе, так и в утке, чередуясь с хлопчатобумажными нитями и образуя прямоугольные ячейки оптимальными размерами 5×5-7×7 мм.

В настоящее время на специализированном производственном участке изготавливается экранирующая ткань. Она используется для защиты персонала при ремонтных работах без снятия напряжения в электроустановках от 110 до 750 кВ. Ткань выпускается по ТУ 88.086.030-95 из углеродной нити типа УН-2 и хлопчатобумажной пряжи на специализированных ткацких двухчелночных станках. Поверхностная плотность ткани составляет 230±10 г/м^2, толщина – 0,8 мм, разрывная нагрузка, измеренная на полоске 210×50 мм, составляет по основе 260 Н, а по утку – 340 Н.

Общий вид ткани показан на рисунке 1.



а б

Рис. 1. Общий вид экранирующей ткани (а) и текстурированной углеродной нити (б)

Этот материал внедрён нами на ОАО “Винницаэлектротехнология”. За несколько лет эксплуатации в качестве защитных комплектов, эти экранирующие материалы хорошо себя зарекомендовали на промышленной частоте. Такие материалы могут быть также рекомендованы для изготовления защитной одежды для операторов телевизионной и электронной аппаратуры в диапазоне СВЧ-частот.

© Д-р техн. наук Л. Р. Вишняков, канд. техн. наук И. Н. Коханая,
В. А. Коханый, О. М. Андриенко, 2006
Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев

УДК 539.32

ПОЛУЧЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ

Известно, что физические свойства твердых тел, в том числе их модуль упругости, зависят от температуры.

Экспериментальные зависимости модуля упругости от температуры для некоторых материалов представлены на рис. 1 [1, 2, 3].

Как видно из рис. 1 для каждого материала существует своя, экспериментально определяемая зависимость между модулем упругости и температурой материала. Важность этих данных трудно переоценить, поскольку значение модуля упругости материала характеризует его упругие свойства при выбранной температуре испытаний. Однако, для получения таких зависимостей необходимо проводить дорогостоящие эксперименты. Кроме того, в инженерной практике существуют определенные сложности при решении задачи по подбору материала с заданным модулем упругости для определенных температурных условий. Поэтому вызывает большой практический интерес получение обобщенной зависимости изменения модуля упругости материала от температуры.

Для получения такой обобщенной зависимости воспользуемся методом анализа размерностей и теорией подобия.

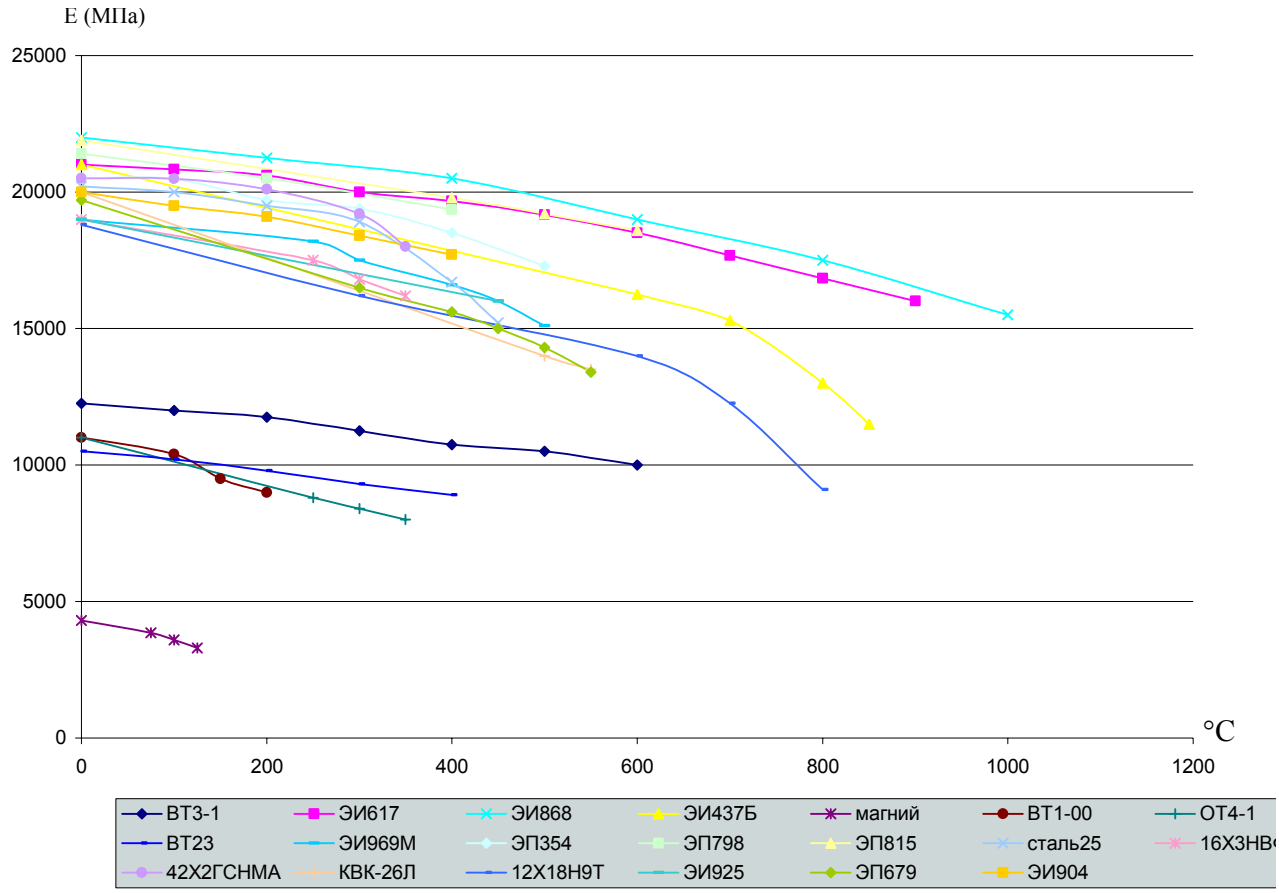


Рис. 1. Экспериментальные зависимости модуля упругости от температуры

Выберем параметры, которые, с точки зрения авторов, определяют процесс изменения упругих свойств материала при изменении температуры:

$$E,\ E_0,\ \rho,\ c,\ \Delta T,$$

где E – модуль упругости при заданной температуре $\left(\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\right)$; E_0 – модуль упругости при температуре $T_0 = 0\,°C$ $\left(\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\right)$; ρ – плотность материала $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$; c – удельная теплоемкость материала $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{с}^2\text{К}}\right)$; ΔT – изменение температуры относительно T_0.

Допустим, что процесс изменения модуля упругости при изменении температуры можно определить по следующему закону:

$$f(E, E_0, \rho, c, \Delta T) = 0. \qquad (1)$$

Это функция пяти переменных, представленная в неявном виде. За основные размерные величины примем метр, секунду, килограмм. Согласно π-теореме теории подобия, из данных переменных величин можно составить один симплекс и один комплекс: $\frac{E}{E_0}$; $\frac{c \cdot \Delta T}{E_0 / \rho}$.

Симплекс характеризует изменение упругих свойств материала. Комплекс $\frac{c \cdot \Delta T}{E_0 / \rho} = \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta T}{E_0}$ является отноше-

нием квадрата средней скорости теплового движения молекул к квадрату скорости распространения упругой продольной волны.

Далее, на основании π-теоремы теории подобия уравнение (1) преобразуем в эквивалентное уравнение с переменными параметрами, заданными в безразмерном виде:

$$f\left(\frac{E}{E_0};\frac{\rho\cdot c\cdot\Delta T}{E_0}\right)=0\,, \tag{2}$$

откуда

$$\frac{E}{E_0}=f\left(\frac{\rho\cdot c\cdot\Delta T}{E_0}\right). \tag{3}$$

Теперь можем приступить к нахождению фактической функции, описывающей изменение модуля упругости в зависимости от физических свойств материала и температуры.

На рис. 2 представлена зависимость $\frac{E}{E_0}=f\left(\frac{\rho\cdot c\cdot\Delta T}{E_0}\right)$. Расчет проводился по формуле (3), а данные для расчета взяты из [1, 2]. При этом учитывалось изменение теплоемкости при изменении температуры и не принималось во внимание изменение плотности материала при повышении температуры.

Полученную зависимость (рис. 2) можно аппроксимировать функцией:

$$y=e^{-21{,}377x}\,, \tag{4}$$

где $x=\frac{\rho\cdot c\cdot\Delta T}{E_0}$, $y=\frac{E}{E_0}$.

Полученное уравнение (4) можно использовать для расчета модуля упругости материала при заданной температуре, а также для подбора материала с заданным модулем упругости при заданной температуре.

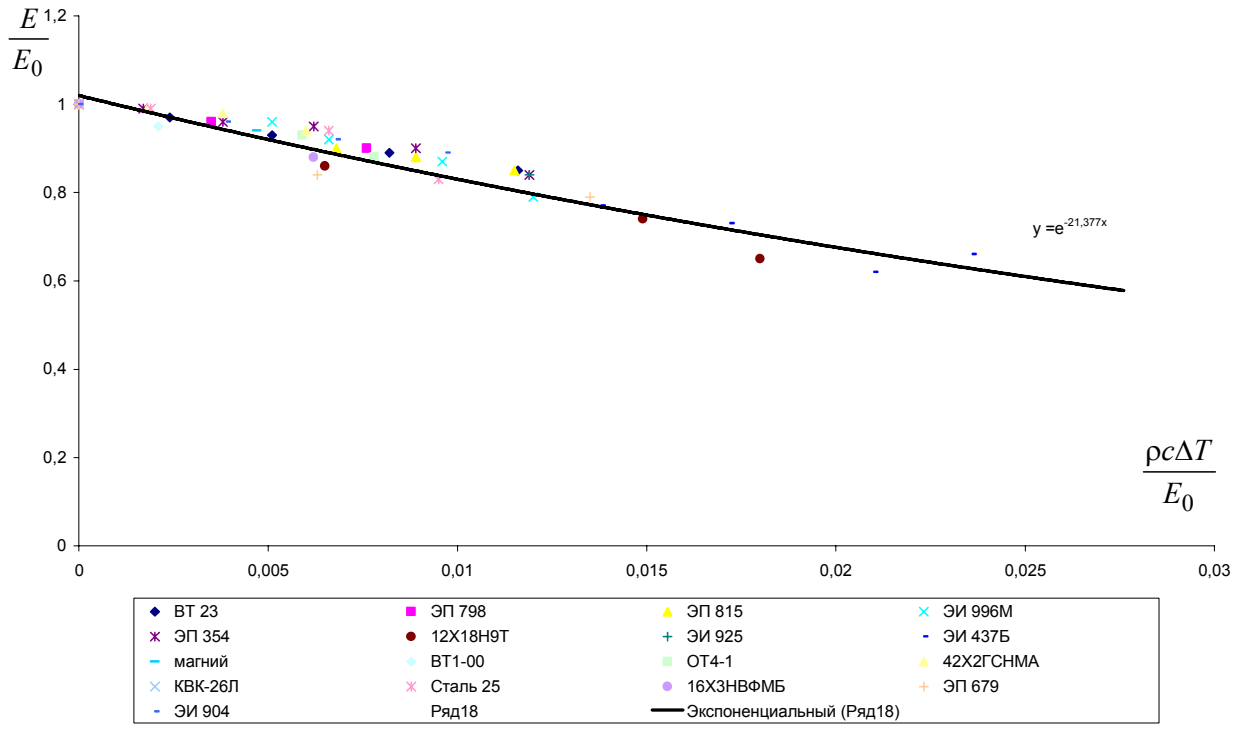


Рис. 2. Зависимость $\frac{E}{E_0}=f\left(\frac{\rho\cdot c\cdot\Delta T}{E_0}\right)$

Список литературы

1. Свищев Г.П., Биргер И.А. Надежность и ресурс авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1969.
2. Трощенко В.Т. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Т1 – Киев: Наукова думка, 1993.
3. Трощенко В.Т. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Т2 – Киев: Наукова думка, 1993.
4. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов, Справочник, под редакцией академика АН УССР И.Н. Францевича.
5. Геншафт Ю.С., Лившиц Л.А., Рябинин Ю.Н. Определение параметров состояния твердых тел при высоких давлениях методом смещения поршня. – Прикладная математика и теоретическая физика, 1962, №5. – С. 107-116.

© А. А. Ружин, д-р техн. наук А. Ш. Асатурян, 2006

Национальный технический университет, г. Запорожье

ЕЖЕГОДНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ В ДЮССЕЛЬДОРФЕ “СТАЛЬ-2006”

В этом году конференция проходила под девизом “Пути через границы”. Этим девизом подчеркивалась роль глобализации экономики в развитии металлургической отрасли во всем мире. Представители металлургической промышленности встретились на конференции со своими поставщиками и потребителями, а также с представителями экономики, политики и науки. Около 3500 присутствующих представляли 25 стран мира. “Сталь 2006” явилась одной из крупнейших мировых встреч, касающихся металлургической отрасли. Конференция проходила в одном из крупнейших конгресс-центров Германии и сопровождалась выставками как крупнейших металлургических концернов, так и фирм, занимающихся разработкой и изготовлением металлургического оборудования и приборов. В конце первого дня работы прошла встреча участников за банкетным столом, где можно было установить личные контакты, встретиться с коллегами и возможными деловыми партнерами. Каждый участник конференции имел возможность пригласить для участия в этом мероприятии супруга или супругу. Мероприятие полностью финансировалось спонсорами.

На пленарном заседании, как и обычно, обсуждались состояние и перспективы отрасли в современных условиях. Представители экономики, культуры и науки обсуждали общественные компоненты глобализации. Какова плата человеческого общества за возрастающую экономическую интеграцию? Что могут внести политика и экономика для признания населением неизбежности глобализации? Форум 2006 г. проходил под девизом “Сталь и современные соединительные технологии”. Обсуждались различные аспекты и технологии соединения стальных изделий. На секциях обсуждались следующие вопросы:

- Новая техника – путь в будущее.
- Торговля металлом в условиях международной конкуренции.
- Развитие технологических процессов формоизменения и измерительной техники.
- Развитие металлургических процессов: неограниченные перспективы.
- Демографические изменения и их влияние на отрасль.
- Качество воздуха в индустриальных регионах Германии.

Состояние и перспективы отрасли в условиях глобализации

С основными докладами выступили председатель Stahlinstitut VDEh и президент экономического объединения “Сталь” Дитер Амелинг (Dieter Ameling) и президент EUROFER Филипп Варин (Philippe Varin). Металлургическая промышленность находится перед серьезными преобразованиями. Индийско-нидерландский концерн Mittal Steel, являющийся лидером в отрасли, перенял концерн Arcelor, занимавший в отрасли второе место. Совсем недавно индийский концерн Tata Steel объявил о присоединении к себе британско-нидерландского предприятия Corus. В результате новое гигантское предприятие Tata – Corus заняло пятое место в списке мировых лидеров взамен ранее имевшегося у Corus девятого. От все новых и новых миллиардных сделок и слияний в отрасли не перестает захватывать дух. Окончания волны концентрации вряд ли стоит ожидать. “В последующие пять лет нас ожидает неослабная консолидация в отрасли”, – утверждает аналитик инвестиционного банка JP Morgan Аниндия Мохинта (Anindya Mohinta). Сейчас объединенная компания Arcelor – Mittal производит около 120 млн. т жидкой стали, что соответствует совместному производству таких предприятий, как Nippon Steel, Posco, US Steel, Corus и ThyssenKrupp. Руководитель одного из крупнейших предприятий Юрген Гроссман (Jurgen Grossmann) считает, что объединенная компания Arcelor – Mittal извлекает из своей мощи колоссальные преимущества как в приобретении сырья, так и в

возможности более узкой специализации отдельных предприятий и агрегатов. Наверняка такие же преимущества захотят в будущем иметь и другие металлургические концерны.

Хотя в 2005 году состоялось около 150 сделок по укрупнению концернов, общая стоимость которых достигла почти 100 млрд. €, отрасль в целом остается еще относительно раздробленной. Такие гиганты как Arcelor – Mittal, Nippon и Posco владеют совместно только 15 % мирового рынка стали. Иначе обстоит дело у поставщиков железной руды. Здесь трем крупнейшим концернам CVRD, BHP-Billiton и Rio Tinto принадлежит примерно 70 % мирового рынка. Более высокая степень концентрации наблюдается также и у отраслей – потребителей. Каждый второй легковой автомобиль в мире произведен GM, Ford или Toyota. Эксперты полагают, что вскоре в автомобильной отрасли останется вообще не более пяти – шести крупнейших концернов. Аналогичная ситуация наблюдается в судостроении. Один из ведущих мировых менеджеров Александр Мальквитц (Alexander Malkwitz) образно пишет, что металлургическая отрасль скоро почувствует неудобство своего разрозненного положения в середине столь концентрированного сэндвича между поставщиками сырья и потребителями. По его мнению, не позднее, чем через 20 лет, и на рынке стали доля трех крупнейших концернов достигнет 60…70 %. Это даст возможность преодолеть ценовой диктат со стороны потребителей и, в первую очередь, со стороны автостроителей.

Как же могут выжить концерны, которые не войдут даже в первую десятку крупнейших? Что произойдет, например, с такими предприятиями как Salzgitter, Georgmarienhuette, Max-Aicher-Gruppe или Voestalpine? Эксперты считают возможным два сценария. Либо они будут поглощены гигантами, либо, наоборот, сумеют извлечь пользу из своего особого положения. Дело в том, что крупные производители концентрируют и будут концентрировать свои усилия на производстве массовой продукции, в т.ч. определенных качественных сталей. Это открывает новые возможности для малых предприятий. Например, предприятие Georgmarienhuette специализируется на вторичной металлургии и, прежде всего, на производстве электростали из стального лома. Такую “мелочь” не может позволить себе крупное предприятие. В этом смысле подобные предприятия имеют шанс при сравнительно небольшом объеме производства занимать одно из лидирующих мест на мировом рынке.

Усиливается давление со стороны российских и китайских металлургов, например, со стороны российского концерна “Северсталь”, принадлежащего миллиардеру Алексею Мордашеву, и концерна “Еврац”, принадлежащего мультимиллиардеру Роману Абрамовичу, которые желают усилить свои позиции на мировом рынке. В Китае следует считаться с некоторым урегулированием прежде раздробленного рынка. Сейчас лидер китайского стального рынка концерн Baosteel проявляет интерес к расширению сфер влияния на другие континенты. Фокус интересов концерна находится в Восточной Европе и в Азии. В Европе и в США осталось лишь немного объектов для покупки, как, например, Nucor, AK Steel и US Steel, которые в США рассматриваются как кандидаты для продажи.

Ведущие немецкие концерны ThyssenKrupp Steel и Salzgitter уверенно смотрят в будущее. ThyssenKrupp, специализирующийся на производстве качественной листовой стали, планирует строить свое предприятие на юге Соединенных Штатов, чтобы усилить свое присутствие на американском рынке. 26 сентября 2006 года официально заложен „первый камень“ в строительство нового металлургического комбината в штате Рио-де-Жанейро (Бразилия). Товарооборот концерна составляет в настоящее время около 50 млрд. €. При этом деятельность концерна является разносторонней. Товарооборот в производстве стали возрастает от 16 до 19 млрд. €. Товарооборот в производстве промышленных изделий возрастает от 19 до 21 млрд. € и в сфере услуг – от 13 до 14 млрд. €. Концерн планирует увеличить свой товарооборот в ближайшее десятилетие до 55 млрд. €.

Металлургический и трубный концерн Salzgitter находится в аналогичном положении. Владея подавляющим количеством акций, оба предприятия надежно защищены от захвата конкурентами. Руководитель концерна неоднократно подчеркивает, что его концерн заинтересован в дополнительных закупках родственных предприятий. Финансовых проблем при этом не существует. Прежде всего это касается производства стальных труб, которое процветает после того, как оно пять лет назад было выкуплено у концерна Mannesmann AG.

Во втором квартале текущего года производство стали в Германии выросло на 7 %. Этот рост связан прежде всего, по мнению экономического объединения “Сталь”, с внутренним оживлением экономики. В последующие месяцы прирост должен еще увеличиться. По мнению Дитера Амелинга (Dieter Ameling), нынешний год стал наиболее успешным для отрасли, начиная с 80-х годов. Основными потребителями стали остаются автомобильная промышленность и машиностроение. Кроме того, отрасль получает выгоды от возрастающего спроса на рынках Китая, Индии и России. Этот общий подъем обеспечивает прирост производства ведущих немецких металлургических концернов, прежде всего ThyssenKrupp Steel, Salzgitter и Georgsmarienhuette. В 2005 году товарооборот отрасли составил 30,3 млрд. € по сравнению с 27,1 млрд. € в 2004 году. Можно полагать, что тяжелые времена для отрасли остались далеко позади. Залогом этому является все возрастающая потребность в стали в Китае и Индии. Большой спрос на сталь проявляют также государства Ближнего и Среднего Востока. Объем заказов из этих стран составляет около 5 млрд. €, в т.ч. из Саудовской Аравии – 2 млрд. € и из Объединенных Арабских Эмиратов – 1,2 млрд. €. В то же время раздаются голоса против чрезмерного дальнейшего развития отрасли в Германии, так как , по мнению некоторых экспертов, следует считаться с растущим влиянием самого Китая на мировом рынке. В то же время китайские металлурги являются серьезными потребителями немецких технологических разработок.

По оценкам Всемирной организации металлургической промышленности, производство жидкой стали в 2006 году достигнет 1,245 млрд.т. Это соответствует приросту 9% по сравнению с предыдущим годом. Из этого количества Китай произведет 420 млн. т, что соответствует приросту 18 %. В следующем году ожидается прирост мирового производства стали лишь на 5 %, т.е. менее, чем в этом году. В конце десятилетия ожидается объем мирового производства жидкой стали 1,4 млрд.т, причем Китай будет производить около 520 млн.т, т.е. более 35 % мирового производства.

Современная техника соединения изделий и материалов

Во вступительном докладе Эрнста Миклоса (Ernst Miklos), В.Данцера (W.Danzer) и профессора Михаэла Цэя (Michael Zaeh) "Соединительные технологии для стали – инновационные стратегии завтрашней продукции" было отмечено, что развитие современной машиностроительной и строительной техники было бы невозможно без соединительных технологий. Соединительные технологии известны еще с древности. Интересно, что примеры подобного рода технологий мы находим и в животном мире: например, пауки склеивают свою паутину. Старейшей технологий соединения является клепка. Этот процесс знали люди еще в бронзовом веке: просверливать части конструкции, вставлять в отверстие заклепку и ударять по ней, пока она не станет плоской и не образует замыкающую головку. Таким образом, изготавливали рыцари свои доспехи, так создавались локомотивы, корабли, мосты и машины. Как легендарный "Титаник", так и парижская Эйфелева башня были собраны с помощью миллионов заклепок. Однако в прошлом столетии сварка почти полностью заменила применение заклепок. Правда, это произошло не везде. В самолетостроении клепка и сейчас играет важную роль. В современной технологии для этого уже не используют обычные молотки, процесс осуществляется и управляется автоматизированными устройствами.

Различные промышленные материалы и различные конструкции требуют соответствующих соединительных технологий. В настоящее время используется множество различных процессов: сварка, клепка, привинчивание, штампование, пайка, сшивка, соединение на гвоздях, склеивание. И каждый из этих видов может иметь несколько подвидов. Если говорить только о сварке, то можно упомянуть электродуговую сварку, лазерную сварку, сварку сопротивлением, точечную сварку. В современной технике около 5 % расходов на изготовление изделий связано с соединительными технологиями. Этими процессами занято около 6 % производственных рабочих.

В докладе Ульриха Дильтай (Ulrich Dilthey), профессора института сварки и соединительной техники в Аахене, рассказывалось о новых перспективах электродуговой и лучевой сварки. При конструировании сварочных установок как для ручной, так и для автоматической сварки обращается внимание на создание предпосылок для фокусировки электрической дуги с целью направленного и улучшенного ввода тепла, обеспечивающего более глубокую сварочную ванну. Результатом является более узкая зона термического влияния при однослойном сварном шве и малой деформации. Дуга загорается быстрее и стабилизируется при меньшей величине тока. Такие принципы заложены, например, в т.н. EWM-force Arc процессе.

Новая серия цифровых установок PHOENIX (от 350 до 500А) с различными вариантами управления, ориентированными на конкретные области применения, открывает новые возможности и для сварочных процессов типа металл – инертный газ / металл – активный газ (MIG / MAG). Время сварки уменьшается на 30 %, достигается существенная экономия инертного газа, дополнительных материалов и энергии. Первые пользователи из металлургической и машиностроительной промышленности, автомобиле- и судостроения сообщают о 50%-ной суммарной экономии при сварке низко- и высоколегированных сталей, а также алюминия и его сплавов в листах толщиной от 5 мм. Цифровая техника со специальными сварочными программами обеспечивает спокойную, стабильную по напряжению дугу, что приводит к хорошей воспроизводимости результатов не только при автоматической, но и при ручной сварке. Для сварки в полевых условиях фирмой ELMAG предложена комбинация сварочного аппарата с генератором тока. Основные электрические параметры: сварочный ток от 130 до 400 А, мощность генератора от 3,5 до 10 kBA, напряжение 200, 230 или 400 В. Электродный сварочный аппарат интегрирован непосредственно в генератор.

Фирма EWM развивает в настоящее время также т.н. EWM-cold Arc технологию (технология "холодной дуги"). Реализуется этот процесс с малым расходом тепла через высокодинамичное включение в сочетании с очень быстрым цифровым управлением. За счет этого устраняются пики мощности при циклическом повторном зажигании дуги. Процесс является привлекательным со многих точек зрения. Спектр применения сварки как соединительной технологии резко возрастает. Если при использовании ранее известных процессов возникали трудности при сварке низко- и высоколегированных сталей уже при толщине 0,8 мм, то новый процесс дает возможность это делать даже при толщине листа 0,3 мм. Сообщается об успешном использовании сварки оцинкованных листов толщиной 0,4 мм в судостроении без повреждения цинкового покрытия.

Лазерная сварка – исторически одно из первых применение лазеров в промышленности. После появления импульсных твердотельных лазеров они почти сразу стали использоваться для микросварки в микроэлектронике. С появлением мощных CO_2 – лазеров были созданы различные технологии лазерной стыковой сварки. В настоя-

щее время технология лазерной сварки разработана настолько, что судостроительные предприятия переходят на этот вид сварки. При производстве крупного судна общая длина сварных швов составляет 800…900 км. Сваривают листы толщиной 12 мм. Обычно сварка ведется в стык без дополнительной присадки материала. Сообщается о применении автоматов, позволяющих производить одновременно до 60 швов со скоростью до 60 м/мин. Комбинация лазера с зеркальной системой позволяет лучше фокусировать излучение в нужной точке.

Предприятие SLV в г. Mannheim уже в течение десятилетий занимается проблемами электроннолучевой сварки. С распространением лазерной сварки в различных отраслях стало ясно, что и эта технология нуждается в развитии, чтобы при постоянном росте спроса можно было, учитывая преимущества и недостатки каждого способа, предлагать все более совершенные варианты. Недостаток лазерного CO_2-излучения заключается в необходимости передачи его на рабочий участок с помощью зеркальной системы. При использовании т.н. ND:YAG – лазера в этом нет необходимости в связи со значительно меньшей длиной волны (1,06 вместо 10,6 mm). В этом случае излучение транспортируется через оптические волокна. В сочетании с промышленными роботами процесс предлагает совершенно новые промышленные применения, например, в области сварки особо тонких листов и жести.

Доклад д-ра Вилко Флюге (Wilko Fluegge), д-ра Герсона Мешута (Gerson Meschut) и инж. Вильгельма Бёлгофа (Wilhelm Boellhoff) был посвящен клеевым и механическим соединениям. За последние десятилетия клей из предмета обихода превратился в важный промышленный материал. Конечно, клеи, применяемые в быту и в промышленности, существенно различаются. Важным преимуществом клея является то, что он позволяет соединять разнородные материалы достаточно прочно и относительно эластично. Кроме того, поскольку соединение производится без существенного нагрева, отсутствуют деформации. Еще одним преимуществом является внешний вид: клеевое соединение едва заметно. Работа по разработке технологии склеивания материалов и клеящих веществ требует участия специалистов разных профилей (механиков, химиков, металлургов, материаловедов). Например, работы по склеиванию высокопрочных сталей проводят в Германии совместно три фирмы: AiF, DVS, FOSTA. Прочность современных клеевых соединений доходит до 1000 МПа, т.е. сопоставима с прочностью высокопрочной стали. В Европе в настоящее время применяется для промышленных целей более 3 млн. т клеев.

Уже давно клеевые соединения широко применяются в медицине и микроэлектронике. Архитекторы соединяют такие разнородные материалы, как сталь, бетон, стекло и древесина с помощью клеев, возводя, таким образом, изящные архитектурные объекты. В настоящее время строительство и транспорт являются основными потребителями клеев. В производстве средств передвижения клей становится конкурентом таких традиционных способов соединения, как сварка, клепка и привинчивание. Ни крупнейший современный пассажирский самолет А-380, ни современный автомобиль BMW 7 нельзя было бы создать без клеевых соединений. При этом клеи используются не только для склеивания фюзеляжа самолета, но и для прикрепления многочисленных кабелей. Может возникнуть вопрос, насколько надежны клеевые соединения при производстве таких ответственных изделий, как самолет. Оснований для беспокойства нет. Использование клеев в самолетостроении стало уже традицией. Первым коммерческим самолетом, созданным с широким применением клеев, был Fokker 28, который успешно эксплуатируется с 1967 года.

В настоящее время использование клеевых соединений поставлено на научную основу. Для того чтобы предсказать прочность, в т.ч. усталостную прочность соединения, используются специальные моделирующие программы, куда вносят экспериментальные данные нагрузочных испытаний. И прежде чем две части конструкции склеиваются, рассчитывается необходимая площадь поверхности склеивания. Кроме того, специальные компьютерные программы моделируют механизмы склеивания на молекулярном уровне. Виртуально распознается, как молекулы клеящего вещества связываются в сетки и каким механизмом они связываются со склеиваемыми поверхностями.

В автомобилестроении впервые склеивание стали применять для оконных стекол. В настоящее время в новой модели A6 Audi длина клеевых соединений составляет 90 м, в модели А- класса Deimler-Chrysler – 120 м, а в модели BMW7 – 150 м. Приклеивается декоративное оформление, шпойлер, внутренняя обшивка и части кузова. С целью уменьшения расхода горючего автомобилестроители постоянно используют все новые облегченные материалы, как, например, более тонкие, но более прочные стальные листы или упрочненные волокнами материалы. Разнородные материалы, из которых состоит современный автомобиль, имеют различные коэффициены теплового расширения, что делает непригодным такие жесткие способы соединения как сварка. Эластичный клеющий материал имеет в этом отношении преимущество.

Есть и другие причины, по которым сварка должна уступать месть склеиванию. При сварке высокопрочных сталей неизбежно происходит потеря прочности в зоне термического влияния. Из пластмасс допускают сварку только темопласты. Винтовые и заклепочные соединения также не позволяют решить задачу, т.к. они уменьшают сечение, а следовательно, и прочность основного материала.

С развитием новых промышленных материалов увеличивается также и ассортимент клеющих веществ. Их создатели активно приспосабливаются к новым потребностям. Решающим качеством клеящего материала в автостроении является баланс между прочностью и определенной эластичностью. Путем добавки эластичных частиц жесткие эпоксидные смолы, составляющие основу современных клеевых материалов, становятся более податли-

выми. Эти эластичные островки диаметром от нескольких сот до нескольких тысяч нанометров останавливают возникающие под нагрузкой микротрещины в эпоксидной основе. Сами эти микротрещины прочность не нарушают. При испытаниях на разрушение клееные кузова показывают лучшие результаты, чем сварные, т.к. клеевые соединения укрепляют кузов и амортизируют удары. Кроме того, клеящие вещества поглощают колебания и уменьшают шум в кузове.

В настоящее время ведутся работы по созданию скленных мостов. Идея одного из проектов состоит в том, чтобы тяжелые плиты проезжей части моста заменить более легкими из волокнистого материала, что повысит допустимую полезную нагрузку на мост. Эти плиты должны быть приклеены к несущим конструкциям моста и склеиваться между собой. Исследователи проводят испытания этой технологии для двухколейного пятидесятиметрового моста в Энгельберге, который был существенно поврежден в результате непогоды. Даже направляющие планки и парапеты будут приклеиваться. Это ускоряет работу и уменьшает время простоя моста. Аналогичный проект разрабатывается и в другом университете, где исследователи приклеивают стальные профили и листы к плитам проезжей части моста. Клеевые соединения эластичнее сварных швов и лучше выдерживают переменные нагрузки. Фактически идея использования клеевых веществ при строительстве мостов не нова. Дорожное полотно моста через Эшер-канал автотрассы 3 между Цюрихом и Саргансом (год строительства 1957) было несколько лет назад заменено клееными плитами из пластмассы, усиленной углеродными волокнами. В восточной Германии также почти 40 лет назад были склеены бетонные плиты дорожного полотна со стальными несущими конструкциями моста.

Проф. Луиза Квинтино (Luise Quintino) из Лиссабона рассказала о сварке трубопроводов из стали X100. Кроме лазерной сварки, в последние годы особенно широкое применение находит т.н. WIG – процесс электродуговой сварки. В этом процессе дуга возбуждается между изделием и нерасплавляемым вольфрамовым электродом. В рабочую зону вокруг вольфрамового электрода вводится инертный газ, который защищает сварочную зону от атмосферного влияния. Расплавляемые канты свариваемых изделий сплавляются между собой, образуя сварной шов. В зону сварки иногда вводится дополнительный материал.

В качестве инертного газа применяется аргон или гелий. Иногда используют смесь газов совместно с водородом. Необходимое количество газа составляет от 5 до 20 л/мин. Роль защитного газа сводится не только к защите сварочной ванны от атмосферного воздействия. Он также обеспечивает стабильность электрической дуги, проплавления и скорости сварки, а также способствует уменьшению вредных выбросов в атмосферу. При этом создаются предпосылки для повышения скорости сварки и оптимизации проплавления. Имеются специальные программы подачи защитного газа. Ряд программ предназначен для повышения скорости сварки (основной защитный газ – аргон). В других программах за счет дополнительного ввода водорода обеспечивается особо чистая (до блеска) поверхность шва.

Представители фирмы DSD NOELL GmbH Гереон Айлинг (Gereon Eiling) и Михаэл Гросс (Michael Gross) рассказали о строительстве уникальной гидроэлектростанции Каранюкар (Karahnjukar) на северо-востоке Исландии и применении сварки в строительстве. С 2008 года эта электростанция с шестью турбинами общей мощностью 690 МВ должна снабжать электроэнергией новый алюминиевый комбинат. Местность, на которой возводится электростанция, находится на 200 миль севернее Рейкьявика, вблизи полярного круга. Район относится к зоне повышенной сейсмической опасности, что предъявляет особые требования к строительству. Для электростанции будет использована энергия талой воды исландских глетчеров. С этой целью создаются в горах крупные водохранилища и строится уникальный тоннель. Длина тоннеля 72 км, диаметр 7 м, глубина 100…200 м. Для строительства тоннеля были специально доставлены из США три проходческие машины. Проходка составляет ежедневно 25 м и требует мощности около 3 МВ. Кроме сверления породы, при проходке используются взрывные работы. В результате строительства тоннеля вода трех одновременно создаваемых водохранилищ будет перенаправлена в долину, где падающая вода приведет в движение турбины. Резерв воды в водохранилищах составляет 8,5 млн. куб. м.

Основу станции составляют два вертикальных трубопровода высотой 420 м, что является самым высоким в мире сооружением подобного рода. Эти трубопроводы состоят из труб диаметром 3400 мм. Трубы изготовлены из термомеханически обработанной мелкозернистой стали D1-MC, которая благодаря особо хорошей свариваемости обеспечила эффективное изготовление конструкции. Сварочные работы проводились в исключительно сложных условиях, связанных как с особенностями местности, так и со сложностью конструкции. Поскольку сварные швы нужно было накладывать в различных неудобных положениях, приходилось использовать ручную дуговую электросварку с последующим тщательным радиационным контролем сварного соединения.

В докладе Дениса Амоса (Denis Amos) из США и Вольфганга Янсена (Wolfgang Janssen) из Германии рассматривались вопросы сварки роторов тепловых электростанций. Проблема состоит в том, что разные части по длине ротора работают в условиях различных температур и давлений. Поэтому целесообразно изготавливать ротор сварным из разных сталей. Это существенно затрудняет выбор материала шва и технологического процесса. При этом приходится учитывать различие температур отпуска двух марок стали, различие их химического состава и свойств, необходимость высокой прочности и вязкости наплавленного металла, а также возможную миграцию углерода из

одной части изделия в другую за счет разного содержания хрома в этих частях. Отработка процесса начинается, как правило, с компьютерного моделирования, после чего производят сварку и исследование опытных образцов.

Производство белой жести

В одной из работ разрабатывали процесс сварки стали 10 %Cr со сталью3,5 %NiCrMoV. Сварку проводили вольфрамовым электродом в среде инертного газа с присадкой в дугу металла определенного состава. Исследовали два варианта процесса. В первом варианте к изделию из стали 10 %Cr проводилась предварительная наплавка переходного металла, этот полупродукт подвергали термической обработке и лишь затем приваривали к стали 3,5 %NiCrMoV. По второму варианту сварку проводили в один прием. Исследования показали возможность применения более простого второго варианта.

Особенно важна подготовка изделия к сварке: предварительная термическая обработка обеих частей, их соосная установка на станке, очистка и стыковка. В современных сварочных аппаратах параметры процесса жестко контролируются и регулируются. Например, чтобы обеспечить постоянную скорость сварки, нужно изменять скорость вращения изделия в зависимости от его диаметра. При проведении сварки электроды с целью лучшего заполнения сварочной ванны совершают колебательные движения. После окончания сварки сварной шов охлаждается по определенному режиму и тщательно проверяется на предмет отсутствия дефектов. Затем проводится окончательная термическая обработка всего изделия.

В связи с тенденцией к повышению рабочих температур в турбинах возникает необходимость применения более высоколегированных сталей, что ставит перед сварщиками все новые задачи. Например, разработан процесс сварки ротора из сталей 30CrMoNiV5-11 (рабочая температура до 650 °C) и 25NiCrMoV14-5 (рабочая температура до 600 °C). Для турбин более высоких параметров изготавливают сварные роторы из сталей 25NiCrMoV14-5 и X12CrMoVNbN10-1-1. Эти стали имеют существенно разные механические свойства. Первая сталь имеет предел прочности 850 МПа, вторая – 1000 МПа. Сварной ротор подвергают отпуску при температуре 620 °C в течение 10 часов. Нагрев выполняют ступенчато с выдержками при 80 и 130 °C. После такой термической обработки предел прочности металла шва составляет 800 МПа.

Сварные соединения вторгаются в нашу жизнь повсеместно, даже там, где люди просто отдыхают, получают удовольствие. Михаэл Смида (Michael Smida) обратил внимание в своем докладе на роль сварки при проектировании и строительстве аттракционов – горок. Форма этих аттракционов бывает разная – от почти вертикальных подъемов и крутых спусков до “верблюдообразных” конструкций с несколькими плавными подъемами и спусками. При проектировании конструкции выполняются следующие виды расчетов: статический расчет, динамический расчет с учетом ускорений и торможений, расчет на усталость, расчет на надежность. Изготовление происходит в две стадии: изготовление рельсовой части и поддержек. Рельсы изгибаются на специальной машине, устанавливаются на платформе и подвергаются защитному покрытию. В качестве поддержек используют профильные колонны или трубы, к которым приваривается платформа. На специальных установках проводят испытания сварных швов на изгиб и частей металлоконструкции на усталость.

В Германии проектирование и изготовление подобных установок проводят фирмы Bandlayout - Maschienenbau Stahlbau и Muenchener Stahlbauer Maurer und Soehne. До 500 т материала расходуется на изготовление одного изделия. Кроме сварки, используется клепка, свинчивание и склеивание. Одним из пионеров строительства аттракционов в Германии считают Вернера Штенгеля (Werner Stengel), который создал уже 230 различных аттракционов, используемых в различных странах. Еще 450 аттракционов было построено с использованием его идей. Вначале использовали деревянные конструкции. С 1963 года основным материалом при строительстве аттракционов стала сталь.

В докладе проф. Вольфганга Блека (Wolfgang Bleck) рассматривались вопросы численного моделирования механических свойств сварного соединения. В основу расчета положено влияние параметров структуры на свойства. Формирование структуры анализируется исходя из химического состава и условий нагрева – охлаждения. При этом определяется не только тип структуры, но и размер и характер взаимного расположения структурных составляющих. В расчете используют т.н. GTN-модель, развиваемую в США и описывающую возникновение, рост и объединение микропор. Эти процессы рассматриваются как функция напряжения. Дальнейшим этапом является возникновение и развитие повреждений, в т.ч. повреждения критического размера.

Герберт Хойзер (Herbert Heuser) и Эльмар Штраке (Elmar Stracke) остановились в своем докладе на вопросе о том, всегда ли металл шва должен иметь такую же прочность, как и основной металл. На практике в большинстве

случаев исходят именно из такой посылки. Это приводит к тому, что часто металл шва имеет более высокую прочность. При рассмотрении этого вопроса особенно важно учитывать возможное снижение прочности в зоне термического влияния.

Современная техника – путь в будущее

Учитывая возрастающее значение экономических факторов в связи с глобализацией в современном мире, приходится пересматривать экономические концепции создания нового оборудования. Сейчас требуются машины и приборы, которые могли бы обеспечить экономное использование в течение всего времени своей работы. В связи с этим возникает новый экономический подход, ориентированный на весь жизненный цикл изделия. Эти вопросы были рассмотрены в докладе инж. Вильгельма Эверса (Wilhelm Evers) и д-ра Энгельберта Весткемпера (Engelbert Westkaemper) „Инвестиционное планирование, ориентированное на жизненный цикл изделия – его реализация и польза для практики». Часто при проектировании новой техники учитывают только расходы по ее созданию, в то время как расходы по поддержанию не всегда учитываются в полном объеме.

Непрерывная разливка тонкой полосы

Отсюда возникает концепция управления жизненным циклом изделия (Lifecycle Management). Вопрос о том, является ли эта концепция временным “модным” течением или имеет долгосрочную перспективу, рассмотрен в докладе Бруно ван ден Хойвеля (Bruno van den Heuvel). Система является серьезной основой для успешной разработки и вывода на рынок новых продуктов и изделий, а также объединяет информацию и людей, организуя их эффективную и слаженную работу. Благодаря этой системе предприятия могут интегрировать в общий процесс различные подразделения, включая отделы маркетинга, продаж, планирования, а также производство, материальное обеспечение, техническое обслуживание и ремонт. Кроме того, система обеспечивает возможность совместной работы партнеров, поставщиков, субподрядчиков, поставщиков услуг и даже клиентов.

Развитие металлургической отрасли стимулирует производство нового оборудования и приборов. Фирмы – участники общества тяжелого машиностроения в рамках немецкого союза машиностроителей и приборостроителей (Arbeitsgemeinschaft Grossanlagenbau im Verband deutscher Maschienen- und Anlagenbau - AGAB) заключили, как сообщает сотрудник SMS Demag AG Дитер Розенталь (Dieter Rosenthal), за период с июля 2005 по июнь 2006 г. договора на поставку оборудования на рекордную сумму – 24,4 млрд. €. По сравнению с 2005 годом это соответствует приросту 1,4 % или 330 млн. €. Основной причиной этого рекорда является возрастающий заграничный спрос. Заграничные заказы возросли по сравнению с предыдущим полугодием на 2 % и достигли объема 18,8 млрд. €. Спросом пользуются прежде всего оборудование электростанций (8,5 млрд. €), сталеплавильное и прокатное оборудование (3,5 млрд. €), а также химическое оборудование (2,3 млрд. €). Внутренний спрос сохранился примерно на прежнем уровне. Крупнейшими производителями металлургического оборудования являются SMS Demag AG и дочернее предприятие концерна Siemens VAI – (ранее Voestalpine Industrie –Anlagen), которые в сумме производят около четверти всего металлургического оборудования в мире.

В настоящее время основным зарубежным заказчиком немецких машиностроителей становится ближний и средний Восток. Объем договоров составляет около 5 млрд. €. Здесь основными партнерами являются Саудовская Аравия и Объединенные Арабские Эмираты. Имеются также заказы из Ирана и Катара. Основой для такого развития ситуации являются длительно удерживающиеся высокие цены на нефть и газ. Доходы от экспорта сырья эти

страны используют для расширения своего промышленного базиса и, в частности, для инвестиций в строительство электростанций, химических и цементных предприятий.

Заказы из Китайской Народной Республики снизились в этом году на 11 % и составляют 1,8 млрд. €. Наоборот, Индия наращивает свои заказы и занимает сейчас по их объему (около 1 млрд. €) четвертое место. Учитывая быстрые темпы индустриализации этой страны и возрастающий жизненный уровень, следует предполагать дальнейший рост спроса на оборудование. Другими важными рынками продажи оборудования были в отчетном периоде США, Италия, Южная Корея и Россия. В текущем году AGAB-фирмы ожидают заказы на сумму более 20 млрд. €. Отрасль смотрит уверенно в следующий, 2007 год. Фирмы уверены в значительном объеме заказов и высокой загрузке своих предприятий.

Рынок стали в условиях конкуренции

Волна концентрации производства обусловливает также концентрацию торговли. Одним из крупнейших дистрибютеров на рынке стали является дуйсбургское торговое предприятие Kloekner & Co AG. Его председатель Томас Людвиг (Thomas Ludwig) хочет использовать эти шансы. В настоящее время рынок стали рассредоточен. Только в Германии существует 65 обслуживающих центров, занимающихся торговлей сталью. Предприятие Kloekner & Co AG имело в 2005 году товарооборот около 5 млрд. € и занимало по этому показателю первое место в Европе. В текущем году товарооборот предприятия возрастет на 100 млн. €. Это происходит за счет покупки и присоединения различных других торговых предприятий. Так, в Европе были закуплены французская фирма Targe и крупное испанское торговое предприятие. В США было также закуплено предприятие с товарооборотом около 55 млн. €. В планах Kloekner & Co AG выход на рынки Восточной Европы и Китая. В США процесс концентрации торговли сталью практически уже завершен.

Новый рельсовый стан

Ряд докладов посвящен проблемам внутреннего рынка ЕС. На сегодняшний день т.н. “внутренний рынок” Европейского Союза представляет собой достаточно слаженную и упорядоченную систему внутренних, прежде всего экономического направления, связей между двадцатью пятью участниками Союза и некоторыми ассоциированными европейскими странами. Система внутреннего рынка Союза – это Таможенный Союз без внутренних таможенных ограничений и с единой внешней границей; а также общие принципы функционирования внутреннего рынка, акцентированные на свободное и беспрепятственное перемещение лиц, товаров, услуг и капиталов.

В докладах д-ра Фритца Циммермана (Fritz Zimmermann) и д-ра Фритца-Гаральда Венига (Fritz -Harald Wenig) ставились вопросы о возможности Евросоюза противостоять некорректным действиям некоторых торговых организаций и стран, а также о роли ВТО в разрешении конфликтных ситуаций. Для ограждения своего рынка от конкуренции вводятся торговые пошлины. Для введения торговых пошлин должно быть доказано, что ввоз той или иной продукции и продажа ее по более низким ценам нанесет ущерб национальной экономике. В марте 2002 года США ввели дополнительный налог от 8 до 20 % на ввоз металлургической продукции. ВТО посчитала эти меры необоснованными, в результате чего ЕС мог выступить с ответными санкциями.

Серьезной проблемой является борьба с демпингом. Значительное число антидемпинговых санкций было применено к Китаю. В 2003 году Китаю был предъявлен иск на сумму 2,2 млрд. USD, в основном в связи с ввозом металлургической продукции. К сожалению, на уровне ВТО существует немного возможностей для борьбы с демпингом. Эта борьба обычно ведется на государственном уровне с обязательным соблюдением требований ВТО. Как известно, ЕС является крупнейшим экспортером труб большого диаметра. С июля 2006 года в ЕС действует антидемпинговая пошлина на бесшовные трубы. Эта пошлина очень сильно затрагивает интересы российских предпринимателей, закрывая практически дорогу российским трубам на европейский рынок. Планируется также увеличить пошлину на алюминиевую продукцию до 7,5 %.

Многие конфликты решаются в рамках Европейской Комиссии. Это осуществляется через Euro Info Centre, куда могут поступать жалобы заинтересованных сторон. С июля 2002 года существует также система SOLVIT-Online-Netzwerk, через которую могут быть поданы жалобы. Срок рассмотрения жалоб составляет 10 недель. В основном, удается успешно разрешить споры, связанные с выходом продукции на рынок, пограничным контролем, свободным передвижением капитала и платежей. Удается разрешать единичные конфликты, связанные с дис-

Электроннолучевая сварка

криминацией, ограничением рекламы, неправомочными требованиями к регистрации и т.д. В то же время существуют и сложные юридические ситуации, рассмотрение которых требует нескольких месяцев, а иногда и нескольких лет.

В докладе проф. Петера Салье (Peter Salje) был поставлен вопрос о ценах на электроэнергию и о возможности государства влиять на ценовую политику в этой сфере. Постановка вопроса не нова и не случайна, поскольку металлургия является крупнейшим потребителем электроэнергии, и цена на электроэнергию оказывает существенное влияние на себестоимость металлургической продукции. По мнению докладчика, государство должно проводить определенную энергетическую политику, целью которой должно быть создание условий для конкуренции на энергетическом рынке и поощрение экологически чистых способов производства электроэнергии. В настоящее время наиболее высокие цены на электроэнергию имеют место в трех европейских государствах: Германии, Великобритании и Италии. Металлургическая промышленность работает в условиях мирового рынка. Поэтому высокие цены на электроэнергию ухудшают конкурентоспособность немецкой металлургической промышленности.

По мнению председателя Stahlinstitut VDEh и президента экономического объединения "Сталь" Дитера Амелинга (Dieter Ameling), проблема должна решаться как на уровне отдельных государств, так и на уровне ЕС в целом. Государственные органы должны обеспечивать условия для участия новых поставщиков на рынке электроэнергии, в частности заботиться о том, чтобы их доступ к электросетям не был слишком дорогим. Вина политиков в повышении цен на электроэнергию состоит также и в том, что введение торговли на эмиссию CO_2 способствовало росту цен на 30 %. Причиной этого является то, что стоимость сертификатов, которые не имеют фактической стоимости, оказалась перенесенной на стоимость электроэнергии. Эта проблема может быть решена только на уровне ЕС.

По мнению Дитера Амелинга, нельзя считать правильной и политику финансирования развития так называемой экологически чистой энергетики (использование энергии солнца и ветра) за счет повышения нынешних цен.

Если учитывать условия Германии, то серьезно говорить об использовании в промышленных масштабах солнечной энергии вообще не приходится. Что касается энергии ветра, то для ее использования необходимо иметь большие резервные мощности, основанные на традиционных источниках энергии. При этом не следует исключать дальнейшее использование атомных электростанций, учитывая, что атомные станции при правильной эксплуатации значительно экологичнее угольных.

Технологические процессы формоизменения и измерительная техника

В последние годы в результате тесной кооперации между металлургами, исследователями и машиностроителями стало возможно существенное развитие процессов эффективного изготовления горяче- и холоднокатаной стали, поковок и штамповок. Разработаны новые методы оптимизации производственных процессов и параметров качества продукции. Целью всех этих мероприятий является минимизация производственных расходов и наиболее полное удовлетворение требований потребителей.

Инж. Норберт Кек (Norbert Koeck) и Ганс Пфайлер (Hans Pfeiler), представители предприятия voestalpine Schienen GmbH в г. Donawitz (Австрия) рассказали о новом рельсовом стане, пущенном недавно в эксплуатацию на предприятии. В нагревательную печь с шагающим подом заготовки поступают либо со склада, либо непосредственно с блюминга. В последнем случае исходная температура заготовок составляет около 200 °С, что позволяет экономить энергию и улучшать экологическую обстановку. Заготовки выгружаются из печи после полного выравнивания температуры по сечению. На черновой линии производится прокатка промежуточного рельсового профиля. На чистовой линии с тремя прокатными клетями получают готовый профиль. В зависимости от требуемых размеров, используют ту или иную комбинацию клетей. Установка по удалению окалины обеспечивает высокое качество поверхности.

В результате автоматического управления гидравлической системой удается настолько точно регулировать зазор между валками, что размерные допуски можно было сократить вдвое. Отпала необходимость смазки калибров, что при использовании старого стана приводило к загрязнению окружающей среды. Смена калибров полностью

автоматизирована, так что в течение 20 минут возможен переход к прокатке нового профиля.

На рольганге, ведущем к холодильнику, находится автоматическая штамповочная машина. С ее помощью на определенном месте рельса наносится маркировка. Между рольгангом и холодильником находится установка для термической обработки рельсов. Процесс закалки головок рельсов с использованием тепла прокатного нагрева, разработанный на предприятии, является уникальным и запатентован во всем мире как HSH-процесс (Head Special Hardened). Он обеспечивает уникальную производительность (более 250 тыс. т в год), которая невозможна ни в одном из других известных процессов, и уникальное качество. В закалочную установку рельс вводится манипулятором, который удерживает его головкой вниз над ванной до тех пор, пока не будет достигнута необходимая температура. При ее достижении головка рельса опускается в закалочную ванну и выдерживается в течение времени, необходимого для образования тонкодисперсной перлитной структуры.

После термической обработки твердость по всему сечению головки оказывается равномерной и достаточно высокой. Такое распределение твердости обеспечивает высокую долговечность рельса, так как даже при сильном его износе колесо будет соприкасаться с высокопрочным материалом. Существенным является то, что высокое сопротивление пластической деформации и абразивному износу головки рельса сочетается с достаточной вязкостью шейки и ножки.

После термической обработки рельс приподнимается и транспортируется на холодильник длиной 125 и шириной 18 м. Тут рельсы охлаждаются на воздухе в течение 3 часов до температуры не выше 60 °С. В конце холодильника находится шлеппер, который направляет рельсы к отводящему рольгангу и к ролико-правильным машинам. За восьмишпиндельной горизонтальной находится семишпиндельная вертикальная машина. Здесь рельс рихтуется по всей длине. Технология рихтовки устанавливается на основании длительного опыта и обеспечивает, с одной стороны, хорошее выравнивание по всей длине, с другой – отсутствие существенных внутренних напряжений. За ролико-правильными машинами начинается адъюстаж, где рельсы подготавливают к отправке. На основании мирового опыта можно утверждать, что рельсы предприятия voestalpine Schienen GmbH являются лучшими в мире. Их характеризуют как “ультратвердые, ультрачистые, ультраровные и ультрадлинные”.

В докладе Ральфа Криста (Ralf Christ) и др. рассказывалось о производстве и путях улучшения качества белой жести на предприятии Rasselstein GmbH, являющемся дочерним предприятием ThyssenKrupp Stahl. Предприятие является крупнейшим производителем белой жести с годовым выпуском около 1,4 млн.т. Процесс производства белой жести организован следующим образом. Горячекатаная полоса сваривается в бесконечную ленту и проходит травление в кислотном растворе с целью более полного удаления окалины. После травления полоса промывается, сушится, подвергается обрезке кромок и опять сматывается в рулоны весом до 27 т. Полоса подвергается холодной прокатке на одной из двух непрерывных линий, каждая из которых состоит из шести четырехвалковых клетей с суммарным обжатием более 90% до толщины 0,12…0,49 мм. В зазор между рабочими валками подается масляно-водяная эмульсия для смазки и охлаждения валков. Для охлаждения дополнительно подается большое количество воды, которая циркулирует по замкнутому циклу.

После прокатки полосу очищают от загрязнений и остатков смазочной жидкости, для чего используют электролитический процесс и очистку щетками. В заключение полоса сушится и либо направляется на термическую обработку в непрерывном агрегате, либо сматывается в рулоны весом до 23 т. Предусмотрено два возможных варианта термической обработки: в проходных или в колпаковых печах. В проходных печах осуществляется кратковременный рекристаллизационный отжиг. Температура печи составляет 880 °С, время пребывания металла в печи – 2 минуты. В колпаковых печах отжиг рулонов проводят при температурах 600…800 °С. Как в проходных, так и в колпаковых печах отжиг осуществляется в защитной атмосфере. После отжига в колпаковых печах достигаются более низкие значения твердости. После отжига проводится дополнительная холодная прокатка, целью которой является не только улучшение штампуемости, что достигается дрессировкой, т.е. холодной прокаткой с малыми обжатиями, но и дополнительное уменьшение толщины. Суммарная степень обжатия может достигать до 40 %.

Сварка ротора паровой турбины

Для получения белой жести используют гальванические покрытия: цинкование или хромирование. Снова рулоны разматывают и сваривают в бесконечную ленту, которую пропускают через гальванические ванны. После цинкования производится нагрев до температуры выше 232 °С (температура плавления цинка), чтобы придать поверхности типичный блестящий вид. Затем полоса промывается в воде. Расход цинка составляет от 1 до 5,6 г/кв.м. Толщина хромового покрытия существенно меньше – расход хрома составляет от 0,05 до 0,1 г/кв.м. После хромирования жесть обычно лакируют. Как оцинкованную, так и хромированную жесть иногда покрывают полимерной

пленкой, что улучшает внешний вид материала и его формообразующие свойства, а также дополнительно защищает от коррозии.

В последнее время на предприятии внедрен ряд мероприятий по улучшению качества продукции и экономии средств. Установлены приборы для контроля качества поверхности и внутренних дефектов горячекатаной полосы, а также приборы для контроля планшетности и внутренних напряжений. В результате этих и других мероприятий удалось существенно сократить допуски. Если в 2003…2004 г.г. допуски составляли –2,5 + 1,0 %, то в 2005…2006 г.г. – 0,8 + 0,2 %. Применение нового электролита для цинкования дало возможность стабилизировать и уменьшить толщину покрытия, что способствовало, с одной стороны, экономии цинка, с другой – улучшению качества. В результате в 2006 году как "очень хорошая" было оценено 99 % продукции завода, в то время как в 1996 году – только 60 %. Параллельно было достигнуто улучшение качества воздуха в районе предприятия. Большую роль играет также снижение веса жести за счет уменьшения толщины. Так, в 1983 году баночка Coca-Cola весила 32 г, в 1995 году – 27 г, а в 2005 году – уже только 22 г.

Установка для непрерывной отливки тонкой полосы

Металлургическая промышленность, по мнению Райнера Факкерта (Rainer Fackert), представителя фирмы IMS Messsysteme GmbH, является двигателем развития измерительной техники, особенно бесконтактной. Фирма специализируется на изготовлении приборов с использованием рентгеновского, изотопного и лазерного излучения. Рентгеновское излучение используют для бесконтактного измерения толщины изделия и его профиля по толщине. Изотопное излучение используют при определении толщины труб и эксцентриситета. С помощью лазерного излучения измеряют расстояния, скорость и длину. Оптические приборы используют для измерения ширины и планшетности листа, а также диаметра труб. Фирма производит и другое измерительное оборудование, в частности для измерения температур и для неразрушающего определения механических характеристик проката.

В докладе особое внимание было уделено использованию разработок фирмы на предприятии Salzgitter Flachstahl. Концерн Salzgitter по своему товарообороту занимает в Европе пятое место среди металлургических концернов, а по производству труб большого диаметра является лидером мирового рынка. Годовой товарооборот концерна составляет около 7 млн. €, годовое производство жидкой стали – около 7 млн. т. Salzgitter Flachstahl производит различные виды горячекатанного листа. На предприятии функционирует множество систем, которые не только осуществляют различные измерения в потоке производства, но и участвуют в управлении производственным процессом. Внедрен стопроцентный контроль в потоке производства механических характеристик путем определения остаточной намагниченности. Значения остаточной намагниченности пересчитываются на значения предела прочности и предела текучести. Необходимость последующего лабораторного контроля отпадает. Для этой цели используют систему EMG-IMPOC-Impulse Magnetic Process Online Controller. Время измерения составляет 1 сек. Для контроля размеров используют системы IMS Width Measurement (измерение ширины), IMS Profile Measurement (измерение профиля), IMS Measuring -System -2Thickness-Flatness (измерение толщины и планшетности). Измерения производятся при скорости движения полосы от 2 до 20 м/сек. Пределы измерения толщины – от 1 до 30 мм, ширины – от 650 до 1900 мм. За счет внедрения измерительных и управляющих систем удается на 95 % продукции добиться точности профиля и планшетности в пределах +20…+40 мкм.

В двух докладах из Китая было показано, во-первых, что промышленно реализуемо производство углеродистых и легированных сталей с годовым объемом около 1 млн. т при применении соответствующих технологий, как например т.н. Steckelstrassen, где горячая полоса прокатывается реверсивно в прокатной клети. С другой стороны, было показано, что холодная прокатка полосы на компактной линии с двумя клетями может быть идеальной пред-

посылкой для эффективного и экономичного производства в сочетании с прокаткой непрерывнолитой заготовки.

В докладе Хорста Янсена (Horst Janssen) и Эберхарда Совка (Eberhard Sowka) сообщалось об опыте эксплуатации установки по прокатке непрерывнолитой заготовки в г. Bruckhausen на предприятии ThyssenKrupp Stahl. На двухручьевой установке непрерывного литья отливаются полосы толщиной от 48 до 63 мм и шириной 900…1600 мм. Скорость разливки составляет до 6 м/сек.

Две туннельные печи длиной по 240 м обеспечивают необходимый дополнительный обогрев и выравнивание температуры по сечению литого сляба. Линия горячей прокатки состоит из семи клетей. Диаметр рабочих валков составляет 620…950 мм, опорных – 1500 мм. Скорость прокатки – до 20 м/сек. Толщина прокатываемой полосы – от 0,8 до 9,09 мм, вес рулона – до 34 т. Горячая прокатка полосы толщиной 0,8 мм еще недавно казалась невозможной. Такая возможность создается благодаря хорошим теплотехническим возможностям нагревательно-выравнивающих печей и уникальному прокатному оборудованию. Непосредственная связь между разливочной установкой и прокатным станом создает уникальные возможности энергосбережения и устраняет проблемы, связанные с транспортировкой слябов к прокатному стану.

Современное состояние металлургических процессов

На секции рассматривались современные технологии доменного производства, процессов прямого восстановления железа, производства и разливки стали. В Германии, как и в других европейских странах, доменный процесс по своей производительности и эффективности остается вне конкуренции по сравнению с процессами прямого восстановления железа. Для того чтобы такая ситуация сохранялась, доменный процесс приходится постоянно совершенствовать. В частности, для повышения производительности, уменьшения расхода кокса и снижения выбросов углекислого газа в атмосферу эффективным является использование в доменном процессе предварительно восстановленной руды.

Обсуждалась техническая и экономическая целесообразность использования водородсодержащего коксового газа для процессов прямого восстановления железа, в т.ч. при последующем использовании традиционного процесса производства стали с применением доменных печей и кислородных конвертеров. Докладчики из Австралии и Венесуэлы доложили о новых аспектах развития процессов прямого восстановления (технологии HIsmelt и FINMET). Стефан Вебер (Stephan Weber) и Нейл Гудман (Neil Goodman) рассказали о современном состоянии технологии HIsmelt (High Intensity Smelting Process). Цех по производству жидкого чугуна на основе этого процесса пущен в Западной Австралии год назад, 28 ноября 2005 года. Сейчас идет наращивание объемов. Выход на проектную мощность 800 тыс. т в год планируется в 2008 году.

Процесс задуман как альтернатива доменной технологии. В этом процессе частицы железной руды инжектируются в расплавленную ванну, где они вступают в реакцию с растворенным углеродом. Продуктами реакции являются железо и монооки углерода. Дальнейшее окисление газов происходит за счет подаваемого в ванну воздуха с температурой 1200 °С, обогащенного кислородом до 35 %. Этот горячий воздух является основным источником тепла в процессе. Основным продуктом процесса является жидкий чугун, который может в дальнейшем использоваться в сталеплавильных агрегатах или разливаться в чушки. Производимый чугун содержит 4,4 % ±0,15 углерода, 0,02 % ± 0,01 фосфора и не более 0,01 % кремния. Побочными продуктами являются шлак и печной газ. При использовании этого процесса достигается повышение эффективности использования материалов и энергоресурсов, а также снижение выбросов CO_2 по сравнению с обычным доменным производством.

О современном состоянии процесса FINMET рассказал представитель венесуэльского предприятия Orinoco Iron Рене Лучена (Rene Lucena). Это – единственный технологический процесс твердофазного восстановления железа из руды мелких фракций, применяемый сейчас в промышленности. Этот процесс применялся на двух предприятиях: на заводе Boodarie Iron в Порт-Хедленде, Австралия, и на заводе Orinoco Iron в Пуэрто-Ордасэ, Венесуэла. В настоящее время производство осуществляется только на предприятии в Венесуэле. Это предприятие функционирует с мая 2000 года и имеет проектную мощность 2 млн. т в год. Процесс является привлекательным и экономичным для получения брикетированного железа из дешевой железорудной мелочи в тех случаях, когда в качестве восстановителя можно использовать природный газ. Для получения брикетов не требуется связующее вещество, в связи с чем продукт отличается высокой чистотой.

В области производства стали было сообщено (доклад Реджиса Леонарда – Regis Leonard) о новом предприятии в США по производству особо высококачественной стали. Речь идет о новом заводе концерна Charter Steel в районе Cleveland Ohio. Предприятие вошло в строй в июне этого года и предназначено для выпуска сортового проката специального качества Special Bar Quality (SBQ). В ноябре 2004 года был заложен фундамент нового плавильно-разливочного комплекса. Построены дуговая электропечь, установка для вакуумирования и четырехручьевая радиальная машина непрерывной разливки с радиусом 9 м. Машина производит заготовки сечением от 140 до 200 мм. Эти заготовки подвергаются прокатке на прутки, сматываемые в мотки. Вес мотков – от 4400 до 5500 фунтов. Стоимость всего проекта составляла 90 млн. $. Мощность предприятия – 700 тыс. т в год. Считается, что предприятие вывело концерн Charter Steel на ведущие позиции в США на рынке такой продукции как прутки,

катанка, проволока. Продукция предприятия отличается высоким качеством поверхности и минимальной сегрегацией.

Новые перспективы открываются также в сообщениях из Нидерландов и Германии, описывающих современную ситуации в непрерывной разливке стали, особенно в связи с опытом разливки тонких полос. Такие полосы могут применяться либо как самостоятельный продукт взамен горячекатаных листов, либо подвергаться в дальнейшем холодной прокатке. Ассортимент разливаемых этим способом марок стали возрастает. Первая промышленная установка такого рода на одном из предприятий ThyssenKrupp была описана нами в прошлогоднем обзоре. История создания этого нового, технически и экономически оптимального процесса демонстрирует наглядный пример видения перспективы развития отрасли политиками, инженерами и экономистами и их совместной плодотворной работы в рамках Евросоюза (напомним, что проект создавали три ведущих европейских концерна –из Германии, Люксембурга и Австрии), которому (хотелось бы верить!) должны последовать фирмы и заводы Украины, возможно, в рамках СНГ, поставленные сегодня в жесткие условия энергетического кризиса и борьбы за рынки сбыта.

Демографические изменения и их влияние на отрасль

Демографические изменения в Германии и других странах Европы являются реальностью, с которой нельзя не считаться. На производственном уровне это должно означать более длительное участие трудящихся в производственном процессе и более поздний переход на пенсию. На секции рассматривался анализ демографических изменений, делались прогнозы их влияния на предприятия и их структуры занятости, а также обсуждались инструменты кадровой политики, которые помогли бы противостоять этим тенденциям. Речь шла о создании решений, которые, будучи интегрированы в единую кадровую стратегию, помогли бы преодолеть негативные демографические изменения.

В докладе Клауса Байлера (Klaus Bailer), например, шла речь о программе “Будущее” предприятия ThyssenKrupp Steel. В настоящее время количество трудящихся на предприятии несколько превышает необходимое. Но уже через несколько лет картина существенно изменится. Средний возраст сотрудников на предприятии составляет сейчас 44 года. Начиная с 2011 года, будут уходить на пенсию ежегодно от 500 до 600 сотрудников. Это может быть угрозой потери опыта, профессионализма, компетентности. В то же время потребность в людях будет возрастать. Для решения этих проблем разработана программа, рассчитанная на период времени с 1 октября 2006 по 30 сентября 2013 года.

За этот период предполагается сократить рабочую неделю с 35 до 34 часов, что создаст предпосылки для включения молодых рабочих в производственный процесс. Будет создано около 500 новых рабочих мест и дополнительно около 1000 молодых людей будет обучено металлургическим профессиям. Сокращение рабочей недели будет происходить путем введения дополнительных шести нерабочих дней в году с соответствующим снижением заработка. Договор по этому вопросу заключен уже между руководством предприятия, советом коллектива и профсоюзом. На предприятии рассматривают этот факт как важное проявление единства. Дальнейшие направления программы – развитие здравоохранения и квалификационных мероприятий для сотрудников всех возрастных групп. Предприятие заявляет о готовности инвестировать больше средств в человеческий фактор с целью повышения работоспособности трудящихся.

Об аналогичном проекте “Кадры-2025” предприятия Salzgitter AG рассказал Петер-Юрген Шнайдер (Peter-Juergen Schneider). Разработана компьютерная программа, которая позволяет моделировать кадровые ситуации. Прежде всего пересматривается отношение к старым кадрам. Опытным сотрудникам предоставляется возможность работать на условиях неполной рабочей недели даже после перехода на пенсию. При этом исходят из того, что в критических ситуациях опыт пожилых людей может помочь иногда больше, чем быстрота реакции молодых. Моделируются разные варианты, чтобы решать, в какой пропорции и как следует набирать новых сотрудников.

Существует два варианта набора молодых кадров. Их можно готовить непосредственно на предприятии либо набирать уже квалифицированных молодых рабочих со стороны. Выяснилось, что набор со стороны сотрудников наиболее перспективного возраста (от 25 до 30 лет) создает предпосылки к текучести кадров и нестабильности. Предпочтительно набирать со стороны людей среднего возраста, которые в связи со своим семейным положением более склонны к стабильности. Существует также возможность заимствования кадров у специальных фирм, сдающих работников в наем. Положительным моментом здесь является то, что таких людей можно брать на время возрастания объема заказов. При этом заметно урезается пакет социальных услуг. Важно умело комбинировать всевозможные варианты, хотя на крупных предприятиях типа Salzgitter AG заимствование работников на время практикуется редко.

Особое внимание предприятие уделяет непосредственной подготовке молодых кадров после школы. Кроме подготовки рабочих профессий, на предприятии совместно с высшей школой Braunschweig/ Wolfenbuettel разработан и осуществляется проект подготовки инженерных кадров. Студенты получают от предприятия стипендию на время обучения в размере 800 € в месяц. Первые два с половиной года происходит посеместровое чередование

теоретического обучения и практической работы на предприятии. По окончании этого цикла студент получает рабочую профессию. Последующее обучение в зависимости от специальности длится полтора или два года, после чего студент приобретает квалификацию бакалавра. Для поступления на такую учебу должны быть соблюдены некоторые предпосылки, в частности, средняя оценка по окончании школьного обучения должна быть не выше 2,4 (по нашим критерием это соответствует примерно баллу не ниже 3,8). Конечно, не исключен прием выпускников других вузов. Перед приемом на работу выпускник проходит серьезное собеседование, к которому он может подготовиться с помощью специальных тренировочных компьютерных программ.

Качество воздуха в промышленных районах Германии

На секции было заслушано 4 доклада, основное содержание которых сводится к следующему. Такие атрибуты промышленных регионов, как серое небо, покрытые пылью подоконники и загрязненный воздух стали уже, к счастью, достоянием истории. В то же время загрязнение воздуха вредными веществами в промышленных регионах остается существенно выше, чем в сельскохозяйственных. Правда, небо в основном остается голубым, т.к. немецкая промышленность в течение последних десятилетий существенно снизила выбросы пыли. Примерно 40 лет назад пылевые выбросы в обеих частях Германии составляли более 3 млн. т в год. В 2002 году эта величина составляла только 209 тыс. т. Большой вклад в эти положительные изменения внесла металлургия. Если в 1960 г. выбросы пыли составляли более 9 кг на тонну жидкой стали, то сейчас это значение снизилось до 300 г на тонну.

Эти перемены произошли как в результате существенных изменения самих сталеплавильных технологий, так и в результате установки новых эффективных фильтров. При этом уменьшились выбросы и вторичной пыли, т.е. пыли, выбрасываемой не через трубы, а при выпуске жидкой стали. Эти т.н. диффузионные эмиссии составляют сегодня около 2/3 общего объема выбросов металлургической промышленности. Конечно, существуют резервы дальнейшего улучшения ситуации, но именно борьба с вторичными выбросами является самой сложной задачей. Часто вторичные выбросы связаны с ухудшением по какой-либо причине работы отсасывающих устройств, и тогда пыль может распространяться через ворота и окна производственных помещений. Посредством увлажнения и установки дополнительных отсосов делаются попытки существенно снизить и эти выбросы.

От 25 до 30 € на тонну стали расходует металлургическая промышленность на природоохранные мероприятия. Это касается не только снижения выбросов пыли, но и охраны водоемов. При этом текущие расходы на поддержание этих мероприятий оказываются подчас выше, чем сами инвестиции. Дополнительной проблемой является то, что многие природоохранные мероприятия приводят к успеху не мгновенно, а лишь по прошествии некоторого интервала времени. Только создание совершенно новых установок принципиально улучшает ситуацию в отношении специфических выбросов. Это показал, например, ввод в действие новой коксовой батареи на предприятии ThyssenKrupp Steel в Дуйсбурге. Заменив старую, она позволила увеличить производство при одновременном существенном улучшении экологической обстановки. В других случаях оказывается результативной лишь сумма нескольких одновременно проведенных природоохранных мероприятий.

В международном масштабе металлургическая промышленность Германии занимает в отношении природоохранных мероприятий ведущие позиции. Одна из причин состоит в том, что в Германии, как и в ЕС в целом, все время понижаются допустимые пределы загрязнения. Поэтому промышленность находится постоянно под давлением государственных органов. В Германии допустимые нормы предусматриваются специальным государственным документом. Этим же документом предусмотрены требования к вновь вводимым в эксплуатацию установкам. Поскольку распространение пыли и других промышленных вредностей происходит независимо от государственных границ, существуют соответствующие программы в рамках ЕС. В центре внимания сейчас находится защита от тонкой пыли. Имеются в виду частицы пыли размером менее 10 мкм. На распространение такой пыли оказывают значительное влияние метеорологические факторы. Например, осадки очищают воздух. Отрицательное влияние оказывают т.н. инверсионные погодные ситуации. При этом в нижние слои атмосферы проникает горячий воздух, происходит слабый воздухообмен, и тонкие частицы пыли остаются на месте.

© Д-р техн. наук А. Л. Геллер, д-р техн. наук В. С. Горелик

Германия, Дюссельдорф (Duesseldorf), 9-10 ноября 2006 г.

Вимоги до структурних елементів тексту статті

Текст статті повинен відбивати подану інформацію у такій послідовності:
- об'єкт дослідження або розроблення;
- мета роботи;
- методи дослідження та апаратура;
- результати та їх новизна;
- основні конструктивні техніко-експлуатаційні характеристики та показники;
- ступінь впровадження;
- галузь застосування;
- значущість роботи та висновки;
- прогнозні припущення про дослідження або розроблення.

Вступ (Introduction)

У вступній частині коротко викладають:
- оцінку сучасного стану проблеми, відзначаючи практично розв'язані задачі, прогалини знань, що існують у даній галузі, провідні фірми, провідних учених та фахівців певної галузі;
- світові тенденції розв'язання поставлених завдань;
- мету роботи та галузь застосування.

Основна частина (Result and discussion)

Викладаючи суть, особливу увагу приділяють новизні в роботі, а також питанням надійності, взаємозамінності, безпеки, екології, ресурсоощадності. Математичні повні докази, що не мають безпосереднього відношення до предмету дослідження та подробиці дослідження редакція залишає за собою право не публікувати, але зберігає для використання в суперечливих питаннях.

Слід викласти відомості про предмет чи об'єкт дослідження або розроблення, котрі є необхідними й достатніми для розкриття суті даної роботи (опис: теорії, методів роботи; характеристик і/або властивостей створеного об'єкта; принципів дії об'єкта та основних принципових рішень, що дають уявлення про його устрій, метрологічне забезпечення та методику дослідження і його результатів).

Якщо необхідно навести інформацію про нові аспекти роботи, інтерпретацію або коментар до результатів і причин, на ґрунті яких робляться висновки і рекомендації, вводять окремий розділ дискусійного характеру.

Виклад матеріалу повинен бути ясним і коротким, без формул і викладень проміжного характеру і громіздких математичних виражень. Варто уникати повторення даних таблиць, графіків, підписів до рисунків у тексті статті, а також наведення чисельних результатів у вигляді таблиць і графіків одночасно.

Висновки (Conclusions)

У висновках наводять оцінку одержаних результатів роботи або її окремого етапу (негативних також) з урахуванням світових тенденцій вирішення поставленого завдання; можливі галузі використання результатів роботи; народногосподарську, наукову, соціальну значущість роботи.

Коректура для перегляду не висилається.

Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні №2/2006

науковий журнал

Головний редактор д-р техн. наук, професор С. Б. Бєліков
Заступники гол. редактора д-р техн. наук, професор В. Ю. Ольшанецький,
д-р техн. наук, професор Ю. М. Внуков

Журнал набраний та зверстаний у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Комп'ютерний дизайн та верстка Н. О. Савчук
Коректори Н. М. Кобзар, В. К. Єршова,
К. С. Бондарчук, Я. О. Мамойко

Підписано до друку 27.12. 2006. формат 60×84/8, 18 др. арк.
Тираж 300 прим. Зам. № 2057
69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64