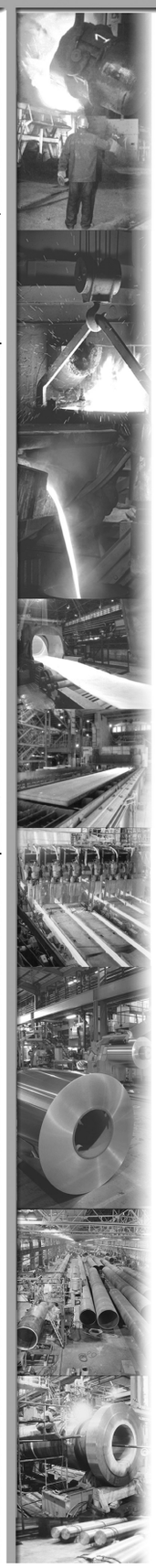
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Том 16 № 3 март 2018



Председатель редакционного совета и главный редактор
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., д.т.н., доц.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А., д.т.н., проф.
КОЛЕСНИКОВ А.Г., д.т.н., проф.

Зам. главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
БОГАТОВ А.А., д.т.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
КОТЕНОК В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф.
ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.
НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ОЛУНД Э., Dr. Ir.
ТУТМАН Т., Dr. Yur.

Ответственный за подготовку и выпуск номера
СЕРИКОВА Е.А.

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63952 от 09.12.2015

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" **39205**) или непосредственно в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Хлямков Н.А., Балакин С.М., Петров С.Н., Беляева Л.А. Развитие термоусталостных трещин и изменений в структуре чугуна с пластинчатым графитом в интервале температур эксплуатации изложниц 99
Гладких И.В. Использование промышленных отходов для изготовления футеровки ковшей в литейном производстве машиностроительных заводов 106
Давыдов А.К. Формирование донной части электрошлаковой отливки и наплавленного слоя 110

Кузнечно-штамповочное производство

Чудин В.Н. Вытяжка с нагревом конической заготовки для газоформовки оболочки 113
Черняев А.В., Гладков В.А. Расчетная модель выдавливания внутреннего фланцевого утолщения на трубе 116

Прокатно-волочильное производство

Мунтин А.В., Солдатов Е.А. Современное оборудование для охлаждения горячекатаной полосы на отводящем рольганге непрерывных широкополосных станов и литейно-прокатных комплексов 120

Материаловедение и новые материалы

Петров А.Н., Соляков А.П., Петров М.А. Исследование структуры заготовок из жаропрочных сплавов после нагрева в расплаве соли хлористого бария 128
Котов С.А., Бурлова А.Н., Зверева Е.Д. Получение композиционного материала с редкоземельными металлами методом прокатки 134

Информация

Складчиков Е.Н., Лазуткин А.В. Расчет долговечности двигателей главного и вспомогательных приводов кривошипных прессов 137
Габельченко Н.И., Белов А.А., Кидалов Н.А. Повышение срока службы рабочих элементов смесителей-пневмонагнетателей 140

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.00 – машиностроение и машиноведение; 05.04.00 – энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение; 05.16.00 – металлургия и материаловедение и в базу данных Chemical Abstracts

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2018

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Vol. 16 № 3 March 2018

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief
LAVRINENKO V.Yu.

Chairman Assistants
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOTENOK V.I.
KOSHELEV O.S.
KRUK A.T.
KUKHAR' V.D.
LARIN S.N.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
NURALIEV F.A.
OVCHINNIKOV V.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
TREGUBOV V.I.
SHATUL'SKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHPUN'KIN N.F.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
ÖHLUND E.
TUTMANN T.

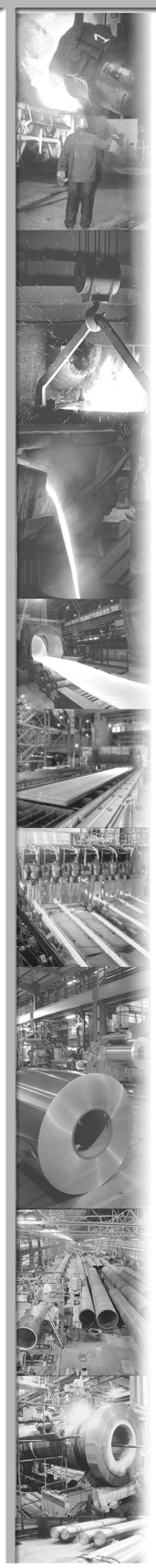
This issue prepared with assistance of specialist
SERIKOVA E.A.

Journal is registered by Roskomnadzor.
The certificate of registration ПИ № ФС 77-63952, December 9, 2015.

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the united catalogue "Pressa Rossi" **39205**) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru



CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Khlyamkov N.A., **Balakin S.M.**, **Petrov S.N.**, **Belyaeva L.A.** Propagation of thermal fatigue cracks and changes in structure of flake graphite iron in interval of mould operation temperature 99
Gladkikh I.V. Use of industrial wastes for manufacture of ladles lining in foundry of engineering plants 106
Davydov A.K. Formation of bottom of electroslag casting and welded layer 110

Forging and Stamping Production

Chudin V.N. Drawing with heating of conical blank for gas forming of shell 113
Chernyaev A.V., **Gladkov V.A.** Calculating extrusion model of internal flanged thickening on tube 116

Rolling and Drawing Production

Muntin A.V., **Soldatov E.A.** Modern equipment for cooling hot-rolled strip on runout table continuous hot strip mills and casting and rolling complexes 120

Physical Metallurgy and New Materials

Petrov A.N., **Solyakov A.P.**, **Petrov M.A.** Research into structural changes of blanks made from Ni-based alloys after heating in salt bath with barium chloride 128
Kotov S.A., **Burlova A.N.**, **Zvereva E.D.** Manufacturing of composite material with rare-earth metals by rolling method 134

Information

Skladchikov E.N., **Lazutkin A.V.** Calculation of durability of main and auxiliary drives motors of crank press 137
Gabel'chenko N.I., **Belov A.A.**, **Kidalov N.A.** Improving of service life of working elements of mixers-pneumatic blowers 140

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.00 – mechanical engineering and machine science; 05.04.00 – power, metallurgical and chemical mechanical engineering; 05.16.00 – metallurgy and material science and in Chemical Abstracts database

Reprint is possible only with the reference to the journal "Blanking productions in mechanical engineering"

УДК 669.13:66.042.22

Н.А. Хлямков, С.М. Балакин, С.Н. Петров, Л.А. Беляева
(НИЦ "Курчатовский институт — ЦНИИ КМ "Прометей", г. Санкт-Петербург)

Развитие термоусталостных трещин и изменений в структуре чугуна с пластинчатым графитом в интервале температур эксплуатации изложниц*

На опытных образцах проведено моделирование размахов упругопластических деформаций в стенках изложниц при температурах эксплуатации и выявлены закономерности развития термоусталостных трещин и изменения в структуре чугуна с пластинчатым графитом. Установлено, что при 150 термоциклах и размахе упругопластических деформаций 0,035 % термоусталостные трещины не образуются. При размахе общих упругопластических деформаций 2,473 % и охлаждении с температуры 700 °С термоусталостные трещины образуются при достижении 40 термоциклов. В случае охлаждения с температуры 850 °С термоусталостные трещины выявлены через 3 термоцикла. При нагреве до 700, 850, 1000 °С и охлаждении до 20 °С в чугуне с пластинчатым графитом по границам пластин графита образуются оторочки из кремнезема, а по границам сульфида марганца — оторочки кремнезема и фосфидов.

Ключевые слова: изложницы; число наливов; термоусталостные трещины; чугун с пластинчатым графитом; размах пластических и упругих деформаций; включения графита; оторочка кремнезема.

Modeling of plastoelastic deformations ranges in moulds walls at operating temperatures is performed on samples. Propagation mechanisms of thermal fatigue cracks and changes in flaked graphite structure are revealed. Established that there is no propagation of thermal fatigue cracks, if there are 150 thermal cycles and plastoelastic deformation range is 0.035 %. In case the range of general plastoelastic deformations is 2.473 % and cooling starts from temperature of 700 ° thermal fatigue cracks propagation at 40 thermal cycles. At cooling starts from temperature 850 °C thermal fatigue cracks are revealed after 3 thermal cycles. In flaked graphite during heating up to temperature of 700, 850 and 1000 °C and cooling up to temperature of 20 °C silica lining is formed along the borders of flaked graphite and silica and phosphides are formed along the borders of manganese sulphide.

Keywords: moulds; number of pourings; thermal fatigue cracks; flaked graphite cast iron; range of plastic and elastic deformations; black lead inclusions; silica lining.

В течение многих десятков лет в изложницы из чугуна с пластинчатым графитом отливают сортовые, листовые и кузнечные слитки. Стойкость изложниц из чугуна с пластинчатым графитом не превышает 100 наливов.

В сталеплавильных цехах металлургических предприятий средняя стойкость изложниц из чугуна с пластинчатым графитом составляет 50...60 наливов при отливке слитков массой 5...10 т. В сталелитейных цехах машиностроительных предприятий средняя стойкость изложниц составляет 40 и 12...18 наливов при

* Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием "Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов" НИЦ "Курчатовский институт" — ЦНИИ КМ "Прометей" при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки в рамках соглашения № 14.595.21.0004, уникальный идентификатор RFMEFI59517X0004.

zp318.indd 99 20.03.2018 14:18:15

отливке кузнечных слитков массой 25...45 и 180...420 т соответственно.

В работе [1] показано, что в ОАО "Западно-Сибирский металлургический комбинат" (ОАО "ЗСМК"), г. Новокузнецк, замена вагранoчного чугуна на доменный передельный, подвергнутый продувке азотом в ковше, позволила повысить на 20 % стойкость изложниц и снизить их себестоимость.

По данным [2], самый низкий удельный расход изложниц на 1 т годной стали достигнут в ОАО "ЗСМК". На предприятии изложницы отливают из доменного передельного чугуна, легированного ванадием и титаном после внепечной обработки методом резонансно-пульсирующего рафинирования. В результате внепечной обработки чугуна средняя стойкость изложниц увеличилась до 59 наливов при отливке слитков массой 7...10 т и не менее 40 наливов для отливки слитков массой 30...40 т.

В работах [1, 2] отсутствуют данные об изменении структуры и свойств чугуна с пластинчатым графитом после внепечной обработки и условиях эксплуатации изложниц.

В [3] показано, что при отливке слитков в изложницах из-за неравномерного распределения температур возникают термические напряжения и деформации. Зоны наибольшей концентрации остаточных напряжений расположены симметрично в верхнем и нижнем торцах изложницы и развернуты на 90° относительно расположения цапф. В изложницах образуются трещины при их нагревах и охлаждении во время затвердевания и извлечения стальных слитков. В первую очередь, трещины возникают в верхней части изложниц, испытывающих максимальный разогрев.

При температурах 400...700 °С происходят графитизация, рост чугуна с пластинчатым графитом и окисление границ графитовых включений [4].

Из анализа литературных данных [1—4] следует, что при нагреве и охлаждении в стенках изложниц возникают не только термические напряжения, но и происходят процессы окисления границ графитовых включений и изменения в структуре чугуна с пластинчатым графитом.

Цель работы — исследование образования и развития трещин, а также изменений в структуре чугуна с пластинчатым графитом при многократных нагревах и охлаждениях в интервале температур эксплуатации изложниц.

Материалы и методы исследования. Для экспериментального определения температуры по высоте стенок изложниц для отливки кузнечных слитков массой 9 и 25,7 т сверлили отверстия глубиной 20 и 170 мм. В отверстия устанавливали хромель-алюмелевые термопары. Непрерывный замер температур осуществляли потенциометром ТХ 160. С учетом полученных данных проведен расчет температур в стенках изложниц для отливки слитков массой 9; 13,56 и 25,7 т по программе СКМ ЛП "Полигон" [5].

На базе тепловых расчетов с использованием пакета программ ANSYS построена трехмерная конечно-элементная модель чугунной изложницы и проведены расчеты термоусталостной прочности изложницы для отливки кузнечного слитка массой 13,56 т со средней толщиной стенки 215 мм.

Для выявления закономерностей образования и развития термоусталостных трещин в чугуне с пластинчатым графитом проведены исследования на опытных образцах.

Механическое воздействие на металл при нагреве и охлаждении опытных образцов оценено расчетным путем по размаху деформаций. Решение задачи строилось в два этапа: сначала решалась тепловая задача с достаточно мелким временным шагом, а затем это решение пошагово переносилось в виде последовательной температурной нагрузки на конечно-элементную модель прочностной задачи.

Физическое моделирование образования термоусталостных трещин проведено по методике, разработанной в НИЦ "Курчатовский институт — ЦНИИ КМ "Прометей".

Из металла цапфы изложницы из чугуна с пластинчатым графитом изготовлены опытные образцы диаметром 14 мм и длиной 30 мм с четырьмя надрезами по образующей. Глубина каждого надреза составляет 0,8 мм. Боковые поверхности надрезов сделаны под углом 60°. Радиусы скругления в вершинах надрезов: 0,1; 0,3; 0,5 и 1,0 мм.

Химический состав чугуна с пластинчатым графитом: 3,44 % C; 2,13 % Si; 0,29 % Mn; 0,09 % P; 0,008 % S; 0,12 % Cr; 0,02 % Cu.

В специальной термической печи образцы нагревали до температур 700, 850, 1000 °С и охлаждали на воздухе или в воде до 20 °С. Режимы нагрева и охлаждения отрабатывали

zp318.indd 100 20.03.2018 14:18:15

на отдельных образцах с термопарой для контроля времени, необходимого для достижения крайних температур цикла.

В автоматическом режиме испытываемый образец в корзинке из жаростойкой проволоки помещали в печь и после выдержки при заданной температуре извлекали из печи и охлаждали на воздухе или в воде. Через определенное число циклов нагрева и охлаждения от образцов отрезали пробы перпендикулярно оси. Со стороны плоскости реза изготовляли шлифы, исследовали микроструктуру, определяли размеры трещин.

При нагреве до температуры 850 °С и охлаждении на воздухе до 20 °С исследования проведены после 20, 45, 100 и 150 циклов, а при нагреве до 1000 °С и охлаждении до 20 °С — после 20 циклов.

Для определения влияния размаха циклических упругопластических деформаций на образование трещин опытные образцы нагревали до температуры 700 и 850 °С ниже и выше точки фазового перехода соответственно и охлаждали в воде.

Точки фазового перехода определяли дилатометрическим методом на дилатометре DIL 402C фирмы Netzsch (Германия).

Микроструктуру чугуна с пластинчатым графитом исследовали на световом металлографическом микроскопе AxioObserber.

Морфологию и элементный состав чугуна с пластинчатым графитом определяли методом рентгеноспектрального микроанализа с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA X-Max-50 (Oxford Instruments Ltd), установленного на растровом электронном микроскопе Vega II Tescan.

Для проведения термических и прочностных расчетов определены точки Ac_1 и Ac_3, а также теплофизические и механические свойства чугуна с пластинчатым графитом изложницы.

Результаты исследований и их обсуждение. На базе тепловых расчетов с использованием пакета программ ANSYS проведен расчет размаха упругих $\Delta\varepsilon_e$ и пластических $\Delta\varepsilon_p$ деформаций в изложнице и сечении образцов. При охлаждении на воздухе с температуры 700 °С в изложнице со средней толщиной стенки 215 мм размах общих деформаций составляет $\Delta\varepsilon$ = 2,920 %. В опытных образцах, нагретых до температур 850, 1000 °С и охлажденных на воздухе, $\Delta\varepsilon$ = 0,035 %, что обусловлено перепадом температур 4...6 °С между вершиной надреза и осью образца. Таким образом, при охлаждении на воздухе размах общих деформаций в опытном образце меньше в 83,4 раза, чем в стенке изложницы.

В опытных образцах при охлаждении на воздухе после 20, 45, 100 и 150 циклов не получили развитие трещины в вершинах надрезов радиусами R = 0,1; 0,3; 0,5 и 1,0 мм (рис. 1).

Для получения размаха общих деформаций в образцах, аналогичных размаху деформаций в изложнице, проведены дополнительные расчеты и установлено, что размах общих деформаций 2,473...2,479 % достигнут при перепаде температур 250 °С между вершиной надреза и осью образца (табл. 1). Этот перепад температур получен при охлаждении образцов в воде с температур 700 и 850 °С. Экспериментально установлены точки фазовых пре-

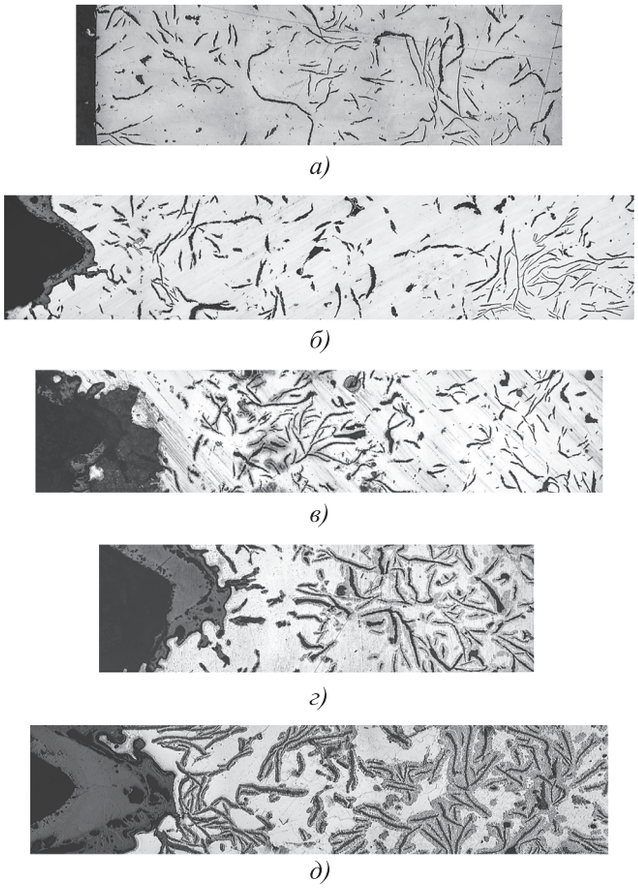


Рис. 1. Микроструктура чугуна после многократного нагрева до 850 °С и охлаждения до 20 °С на воздухе (×100):

а — перед началом испытаний; *б* — после 20 циклов; *в* — после 45 циклов; *г* — после 100 циклов; *д* — после 150 циклов; *б—д* — R = 0,1 мм

zp318.indd 101 20.03.2018 14:18:15

1. Размах упругих, пластических и общих деформаций при охлаждении в воде с температур 700 и 850 °С

Интервал температур, °С	Радиус надреза, мм	$\Delta\varepsilon_e$	$\Delta\varepsilon_p$	$\Delta\varepsilon$
		%		
20...700	0,1	0,438	1,968	2,473
20...850		0,439	1,973	2,479
20...700	0,3	0,394	0,845	1,30
	0,5	0,384	0,588	1,031

вращений в исследуемом чугуне: Ac_1 = 785 °С; Ac_3 = 815 °С.

Таким образом, охлаждение образцов в воде осуществляется с температуры 700 °С (ниже точки Ac_1) и с температуры 850 °С (выше точки Ac_3). Из проведенных расчетов следует, что при повышении температуры на 150 °С размах общих деформаций повышается на 0,006 %, в том числе пластической деформации — на 0,005 %. С увеличением радиуса надреза с 0,1 до 0,3 и 0,5 мм размах общих деформаций уменьшается в 1,9 и 2,4 раза соответственно (см. табл. 1).

После 5 и 19 циклов охлаждения в воде с температуры 700 °С в вершине надрезов трещин не выявлено. С увеличением числа термоциклов до 40 в вершине надрезов трещины обнаружены (рис. 2). Глубина трещин составила 0,55 мм при радиусе R = 0,1 мм, 0,50 мм при R = 0,3 мм и 0,15 мм при R = 0,5 мм. В вершине надреза радиусом 1,0 мм трещины не выявлены.

После проведения 70 термоциклов в вершинах с надрезами радиусами 0,1 и 0,3 мм длина трещин не изменилась, а в вершинах с надрезами радиусами 0,5 и 1,0 мм глубина трещин увеличилась до 0,2 мм.

Другие результаты получены при охлаждении образцов в воде с температуры 850 °С (выше точек Ac_1 = 785 °С; Ac_3 = 815 °С). В вершине надреза с R = 0,1 мм трещина выявлена после 3-го цикла, далее она увеличивалась после каждого термоцикла. На 5-м цикле трещины выявлены в вершинах с надрезом радиусом 0,5 мм (см. рис. 2).

После 19 циклов нагрева до 850 °С и охлаждения в воде до 20 °С глубина трещин стабилизируется на уровне ~3,8 и 3,6 мм в вершинах с надрезом радиусом 0,1 и 0,3 мм соответственно и до 1,6 и 1,4 мм в вершинах с надрезом радиусом 0,5 и 1,0 мм. С увеличением числа циклов с 19 до 25 происходит раскрытие трещин при замедлении их роста в длину (табл. 2).

Остановка роста трещин в длину является следствием уменьшения размаха деформаций при снижении перепада температур между вершиной трещин и осевой зоной образца.

Исследование микроструктуры чугуна с пластинчатым графитом показало, что при нагреве образцов до температур 700, 850 и 1000 °С и охлаждения до 20 °С в поверхност-

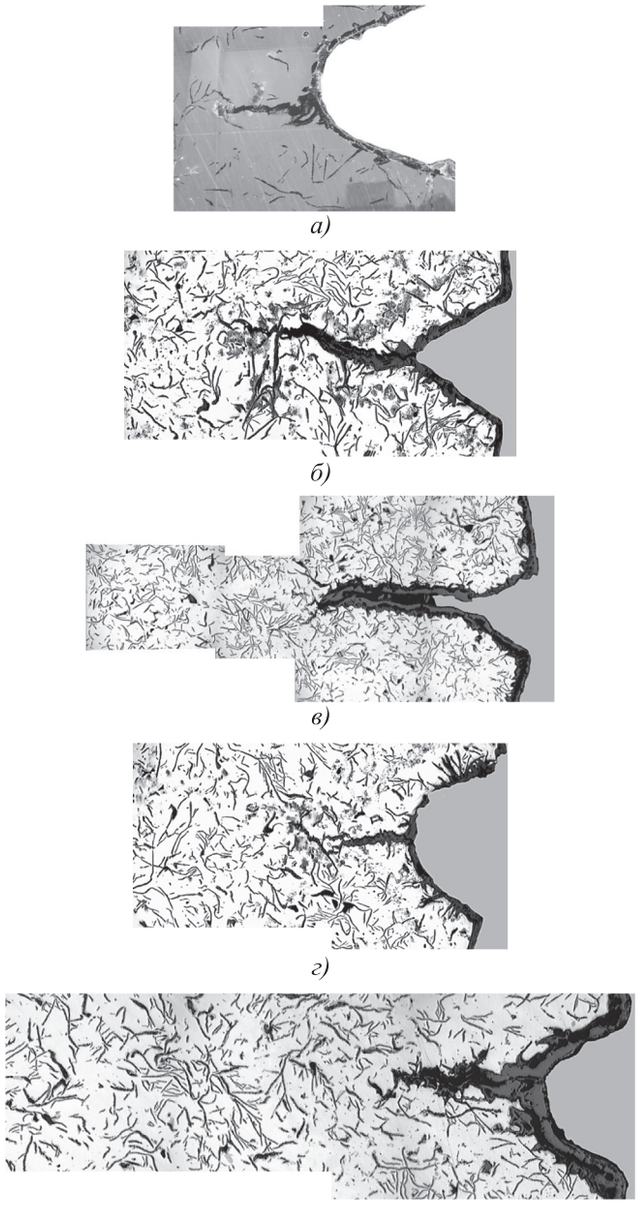


Рис. 2. Трещины и микроструктуры образцов после нагрева до 700 (*а*) и 850 °С (*б—д*) и охлаждения в воде при различных радиусах надреза и числе циклов нагрева и охлаждения:

а — R = 0,1 мм, 40 циклов; *б* — R = 0,1 мм, 5 циклов; *в* — R = 0,1 мм, 19 циклов; *г* — R = 0,5 мм, 5 циклов; *д* — R = 0,5 мм, 19 циклов; *а* — ×100; *б—д* — ×50

zp318.indd 102 20.03.2018 14:18:15

2. Изменение длины трещины в зависимости от числа циклов и радиусов надреза при охлаждении образцов в воде с температуры 850 до 20 °С

Число циклов	Длина трещин, мм, при радиусе надреза, мм			
	0,1	0,3	0,5	1,0
5	1,48	1,20	0,68	—
13	3,25	2,90	1,20	0,46
19	3,80	3,60	1,60	1,40
25				

ной зоне образцов вокруг пластин графита образуются оторочки (см. рис. 1). При повышении числа циклов увеличиваются размеры оторочек.

Аналогичные результаты получены при нагреве образцов до температур 700 и 850 °С с последующим охлаждением в воде до 20 °С (см. рис. 2). Толщина оторочек увеличивается с ростом числа циклов.

Исследование распределения элементов показало, что вокруг включений графита и сульфидов марганца образуются области с повышенным содержанием кислорода и кремния (рис. 3, 4).

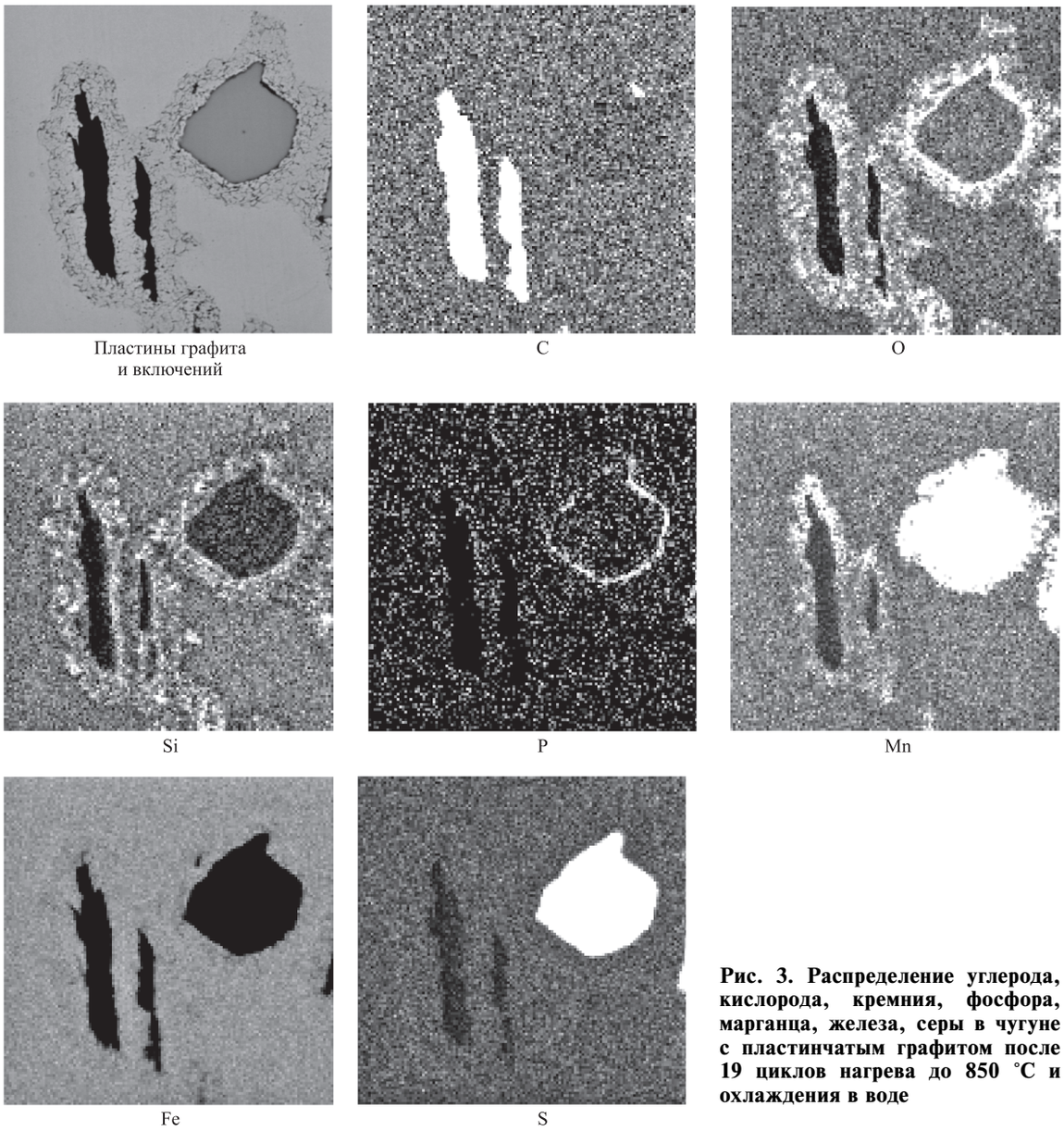


Рис. 3. Распределение углерода, кислорода, кремния, фосфора, марганца, железа, серы в чугуне с пластинчатым графитом после 19 циклов нагрева до 850 °С и охлаждения в воде

zp318.indd 103 20.03.2018 14:18:15

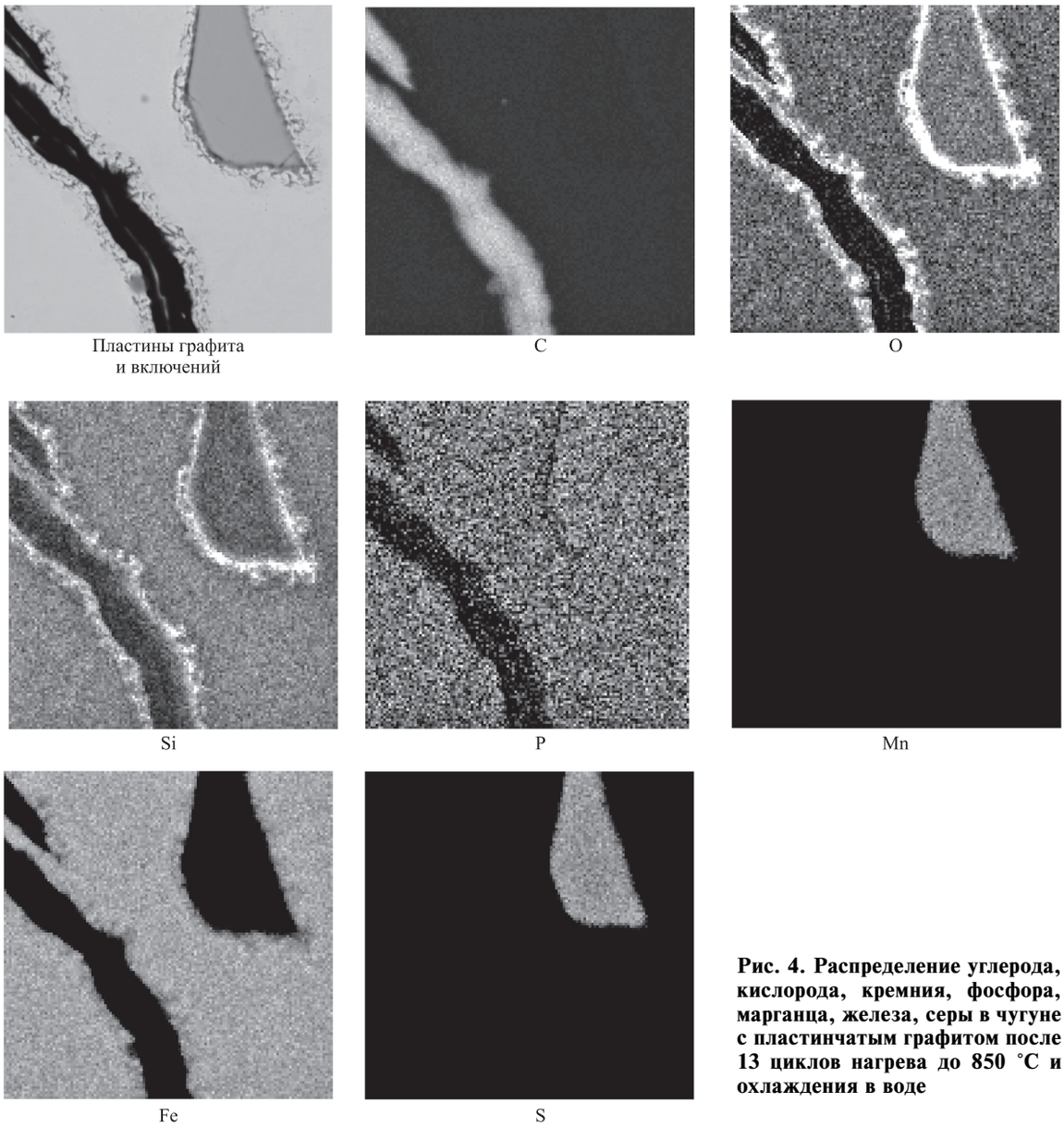


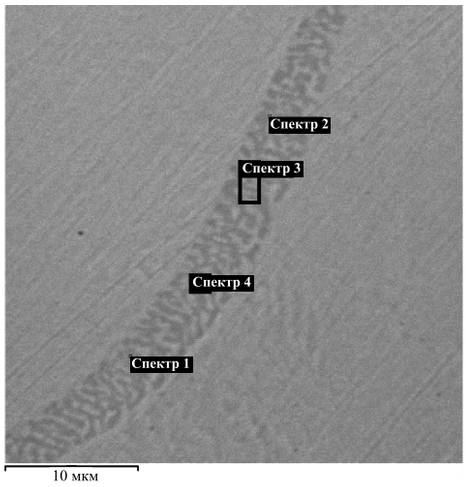
Рис. 4. Распределение углерода, кислорода, кремния, фосфора, марганца, железа, серы в чугуне с пластинчатым графитом после 13 циклов нагрева до 850 °С и охлаждения в воде

По мнению авторов статьи, образование оторочек связано с диффузией кислорода через поры на границах раздела металла с пластинами графита или сульфидных неметаллических включений. При повышении температуры и концентрации кислорода на границах раздела фаз происходит взаимодействие кремния с кислородом с образованием включений кремнезема. По мере уменьшения содержания свободного кремния и кислорода происходит диффузия их атомов на границу раздела фаз, что приводит к дополнительному образованию включений кремнезема и разрыхлению структуры металла.

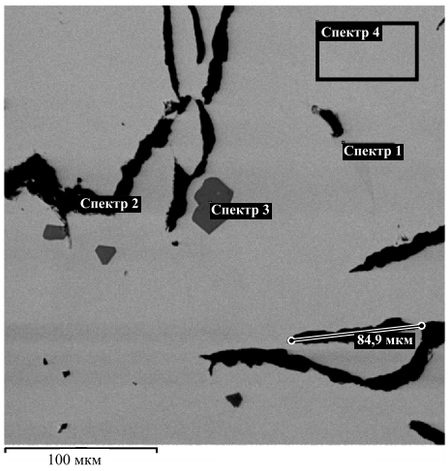
При циклических нагревах и охлаждениях происходят разрушение фосфидной эвтектики в чугуне с пластинчатым графитом и выделение фосфидов вокруг сульфидов марганца и пластин графита (см. рис. 3—6).

Определение локального химического состава показало, что вокруг графитовых включений почти в 2 раза увеличивается содержание кремния (с 2,13 до 4,17 %). Процессы образования оксидных неметал-

zp318.indd 104 20.03.2018 14:18:15



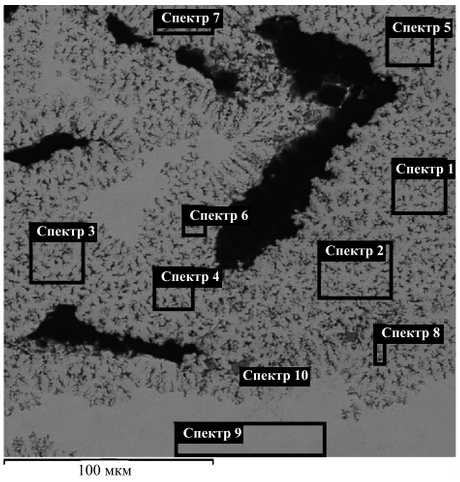
Спектр	Химический состав, % мас.						
	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe
1	0,06	12,97	0,31	0,45	0,90	0,92	84,38
2	0,19	11,82	0,14	0,44	0,83	0,95	85,63
3	0,14	10,01	0,07	0,80	1,07	0,83	87,07
4	0,27	10,52	0,14	0,64	0,93	1,02	86,47



Спектр	Химический состав, % мас.							
	C	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe
1	—	—	9,96	—	0,64	0,96	0,98	87,46
2	98,7	0,26	—	—	—	—	—	1,02
3	—	—	—	36,8	—	—	62,0	1,23
4	—	2,15	0,24	—	—	—	0,49	97,1

Рис. 5. Включения графита, сульфидов, фосфидов и карбидообразующих элементов ванадия и хрома в чугуне с пластинчатым графитом до термоциклирования

лических включений и фосфидов по границам пластин графита, сульфидов марганца при нагревах, охлаждениях необратимы и приводят к деградации свойств серого чугуна.



Спектр	Химический состав, % мас.						
	N	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe
1	—	2,84	—	—	—	0,25	96,91
2		3,18			0,15	0,85	95,83
3		2,79			0,16	0,57	96,49
4		3,24			0,10	0,48	96,17
5		2,58			0,15	0,29	96,98
6		3,15			0,18	0,46	96,21
7		3,98			0,25	0,61	95,17
8		4,17			0,33	1,10	94,40
9		2,04			0,10	0,34	97,53
10	20,15	—	73,8	3,57	—	—	2,48

Рис. 6. Включения графита, оксидов кремния, нитридов титана и ванадия в чугуне с пластинчатым графитом после 100 циклов нагрева до 850 °С и охлаждения на воздухе

Выводы

1. В чугуне с пластинчатым графитом не образуются термоусталостные трещины при охлаждении на воздухе с температур 850 и 1000 °С и размахе общих (упругих и пластических) деформаций до $\Delta\varepsilon = 0{,}035$ %. При увеличении $\Delta\varepsilon$ до $(2{,}476 \pm 0{,}003)$ % термоусталостные трещины получают заметное развитие после 40 циклов нагрева до температуры 700 °С и охлаждения до 20 °С. При нагреве до 850 °С (выше точек $Ac_1 = 785$ °С; $Ac_3 = 815$ °С) и охлаждении до 20 °С дополнительно к термическим деформациям накладываются структурные изменения, что приводит к образованию трещин в первые три термоцикла.

2. При нагреве до температур 700, 850 и 1000 °С в чугуне с пластинчатым графитом вокруг пластин графита и сульфидов марганца

zp318.indd 105 20.03.2018 14:18:17

происходит образование оторочек из кремнезема, фосфидов и других оксидных неметаллических включений.

3. Выявленные закономерности образования термоциклических трещин и изменений в структуре чугуна с пластинчатым графитом необходимо учитывать при разработке конструкций изложниц и требований к их эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кустов Б.А.** Внепечная обработка доменного чугуна для отливки изложниц // Сталь. 1989. № 6. С. 25—26.

2. **Андреев В.В., Лубяной Д.А., Самсонов Ю.Н. и др.** Разработка технологии внепечной обработки доменного чугуна для изготовления сменного металлургического оборудования с повышенной эксплуатационной стойкостью // Металлург. 2014. № 6. С. 86—88.

3. **Пантелеева А.В., Ковалевич Е.В.** Компьютерное моделирование напряженного состояния изложниц для слитков высоколегированной стали // Литейное производство. 2013. № 7. С. 21—23.

4. **Чугун:** справочник / под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. М.: Металлургия, 1991. 576 с.

5. **Тихомиров М.Д.** Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача // Литейное производство. 1998. № 4. С. 30—34.

Николай Александрович Хлямков, канд. техн. наук,
npk6@ crism.ru;
Сергей Михайлович Балакин;
Сергей Николаевич Петров, канд. хим. наук;
Любовь Афанасьевна Беляева

УДК 669:054.8:666.76

И.В. Гладких
(Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева)

Использование промышленных отходов для изготовления футеровки ковшей в литейном производстве машиностроительных заводов

Исследована возможность использования промышленных отходов для изготовления огнеупорных материалов для футеровки раздаточных и разливочных ковшей в литейном производстве. Показано, что полученные огнеупорные материалы по своим качественным характеристикам удовлетворяют требованиям ГОСТ 390—96, соответствуют маркам ША и ШБ.

Ключевые слова: литейное производство; ковши; футеровка; огнеупорные материалы; промышленные отходы.

The possibility of using of industrial wastes for production of refractory materials for lining of transfer and casting ladles in foundry is studied. It is shown that the obtained refractory materials meet the requirements of GOST 390—96, in accordance with their qualitative characteristics, they correspond to ShA and ShB brands.

Keywords: foundry; ladles; lining; refractory materials; industrial wastes.

Для транспортировки расплавленного металла и заливки литейных форм в литейном производстве машиностроительных заводов применяют раздаточные и разливочные ковши. В качестве футеровки ковшей используют алюмосиликатные огнеупорные материалы, в основном шамотные огнеупоры марки ША с содержанием Al_2O_3 не менее 30 % [1, 2].

zp318.indd 106 20.03.2018 14:18:18

Сырьем для производства шамотных огнеупоров являются огнеупорные глины и их наиболее чистые разновидности — каолины. Для уменьшения усадки при сушке и обжиге огнеупорных изделий в глиняную массу вводится большое количество шамота (предварительно обожженная и измельченная в порошок глина). Альтернативный материал дорогостоящему и дефицитному природному сырью — промышленные отходы, образующиеся в значительном количестве и представляющие собой перспективный источник возобновляемого техногенного сырья.

В статье приведены результаты исследований возможности использования промышленных отходов в качестве техногенного сырья для получения огнеупорных материалов для футеровки литейных ковшей машиностроительного производства. Основным огнеупорным сырьем техногенного происхождения являлись отходы огнеупорных материалов, в частности лом шамотного кирпича, который применяли в виде заполнителя. В качестве корректирующих добавок использовали отвальный шлак электросталеплавильного производства и огнеупорную глину вскрышных пород.

Связующий материал — *водная керамическая вяжущая суспензия* (ВКВС) кремнеземистого состава, полученная механической обработкой микрокремнеземистой пыли уноса производства ферросилиция в воде с регулируемым значением pH = 11...12. Объемная доля твердой фазы в ВКВС составляла 0,3...0,5, что относит данный связующий материал к классу неорганических клеев-связок. Плотность ВКВС 1,35...1,4 г/см^3, динамическая вязкость 1,2...1,56 Па·с [3].

Для ВКВС свойственен полимеризационный характер твердения, в основе которого лежит реакция образования полиядерных соединений из гидратационных комплексов. В результате этих процессов формируется пространственная структурная сетка, прочность которой определяется концентрацией контактов между частицами дисперсной фазы и прочностью единичного контакта. Изделия, полученные на основе ВКВС, не требуют обжига и отличаются высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками [4, 5].

При исследовании химического состава промышленных отходов установлено, что шамотный лом близок по составу к исходным огнеупорам, за исключением снижения содержания диоксида кремния SiO_2 с 58,3 до 51,6 % (табл. 1). По содержанию Al_2O_3 (не менее 28 %) и огнеупорности (не ниже 1630 °С) шамотный лом удовлетворяет требованиям, предъявля-

1. Химический состав промышленных отходов, % мас.

Компоненты	Шамотный лом	Шамотный кирпич	Шлак ЭСПЦ	Огнеупорная глина
SiO_2	51,60	58,30	10...20	52,92
Al_2O_3	33,32	32,40	5...7	30,80
Fe_2O_3	1,05	0,90	4...6	0,10
CaO	0,53	0,33	45...50	0,30
MgO	0,57	0,40	6...15	0,40
TiO_2	1,20	0,80	—	0,68
$K_2O + Na_2O$	3,13	2,24	—	0,7
MnO	—	—	6...12	—
P_2O_5	—	—	0,5...1,5	—
Потери при прокаливании, % мас.	8,60	4,63	14,10	—
Огнеупорность, °С	1690	1690	—	1450

zp318.indd 107 20.03.2018 14:18:18

емым к огнеупорным заполнителям марки ЗШБ по ГОСТ 23037—99.

Изучение компонентного состава отвального шлака электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) показало, что содержание CaO в нем составляет более 45 %, Al_2O_3 — менее 8 % (см. табл. 1), т.е. характеризует отход как высокоосновный (основность $B = 3{,}4$). В огнеупорной глине содержание Al_2O_3 + TiO_2 равно 31,48 %, что относит глину к полукислому сырью.

Исследованиями гранулометрического состава промышленных отходов установлено, что крупность огнеупорного заполнителя на основе шамотного лома составляет 0...1 мм, средний размер частиц 0,47 мм. Фракционный состав шлака представлен интервалом крупности 1...10 мкм, в том числе частицами размером менее 8 мкм (более 40 %). Основная масса частиц глины вскрыши (76,2 %) имеет крупность менее 0,2 мм, средний размер 0,11 мм.

Одним из основных термомеханических свойств огнеупорных материалов является термическая стойкость, для повышения которой использовали отвальный шлак ЭСЦП. Известно, что с повышением содержания CaO более 40 % шлаки склонны к силикатному распаду вследствие перехода C_2S из неустойчивой β-формы в стабильное γ-состояние. Этот процесс сопровождается увеличением объема кристаллической решетки на 10...12 %, возникновением значительных внутренних напряжений, в результате чего шлак растрескивается и рассыпается [6].

Рентгенофазовым анализом установлено, что в исследуемом шлаке присутствует до 70 % C_2S γ-формы при незначительном содержании C_2S β-формы, что благоприятно сказывается на увеличении термостойкости огнеупорных материалов [7].

В целях изучения основных качественных показателей (плотность, водопоглощение, открытая пористость, предел прочности при сжатии, термостойкость, огнеупорность) огнеупорных материалов на основе промышленных отходов были изготовлены опытные образцы, полученные методами полусухого прессования при давлении 5 МПа и вибрационного формования (виброуплотнение).

2. Влияние содержания шлака ЭСПЦ на плотность, водопоглощение и открытую пористость образцов огнеупорных материалов

Содержание шлака ЭСПЦ, % мас.	Плотность, кг/м^3	Водопоглощение, %	Пористость открытая, %
	при виброуплотнении/прессовании		
0	2000/2000	11,5/10,4	23,6/21,3
5	1900/1970	10,2/10,7	20,0/21,5
10	1930/1950	14,1/13,7	26,0/24,0
15	1870/2000	13,0/13,0	24,3/24,3
20	1840/1970	12,6/12,7	25,2/25,2
25	1840/1980	12,6/12,6	25,2/24,3

Для увеличения пластичности в состав виброуплотненных образцов вводили глину вскрыши в количестве 10 % мас. Содержание ВКВС для виброуплотненных образцов составляло 20 % мас., для прессованных — 10 % мас. Количество шлака ЭСПЦ изменяли от 0 до 25 % мас. Сушку образцов осуществляли в лаборатории на стеллажах, а затем — в сушильном шкафу в два этапа: при температуре 60...70 и 120...130 °С.

В табл. 2 представлены результаты исследований влияния содержания шлака ЭСПЦ в сырьевом составе на плотность, водопоглощение и открытую пористость образцов огнеупорных материалов.

Установлено, что содержание шлака практически не влияет на исследуемые качественные показатели образцов, определяющую роль в данном случае играет метод их получения.

Увеличение содержания шлака в составе образцов огнеупорных материалов способствует росту термостойкости практически в 2 раза, однако при его содержании выше 20 % мас. этой тенденции не наблюдается (рис. 1, *а*).

Исследование прочностных свойств образцов огнеупорных материалов показало, что повышение содержания шлака в составе ведет к снижению предела прочности (рис. 1, *б*). Это связано с изменением соотношения составляющих компонентов в материале, определяющих наиболее прочностную фрагментарную структуру. Установлено, что для обеспечения оптимального соотношения термостой-

zp318.indd 108 20.03.2018 14:18:18

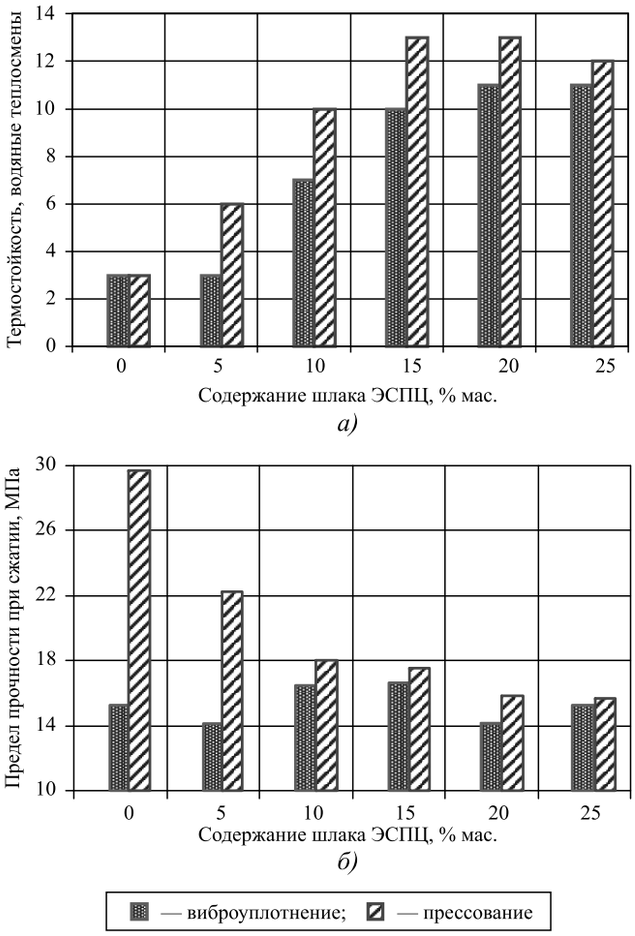


Рис. 1. Влияние содержания шлака на термостойкость (*а*) и предел прочности при сжатии (*б*) огнеупорных материалов

кость—прочность: 8...10 водяных теплосмен — 16...18 МПа в шихту целесообразно вводить 10 % шлака.

В результате проведенных исследований получены огнеупорные материалы на основе промышленных отходов, которые по своим физико-механическим показателям соответствуют требованиям, предъявляемым к огнеупорам, традиционно используемым для футеровки литейных ковшей.

Огнеупорный материал, полученный методом полусухого прессования, с содержанием шлака ЭСПЦ 10 % характеризуется открытой пористостью 24 %, пределом прочности при сжатии 18 МПа, термостойкостью 10 водяных теплосмен, огнеупорностью 1680 °С, относится к марке ША по ГОСТ 390—96.

Виброуплотненный материал, содержащий глину вскрыши и 10 % шлака ЭСПЦ, по своим качественным показателям (открытая пористость 26 %, предел прочности при сжатии 17 МПа, термостойкость 7 водяных теплосмен, огнеупорность 1660 °С) соответствует марке ШБ подгруппы II (ГОСТ 390—96).

Таким образом, на основе промышленных отходов получены огнеупорные шамотные изделия марок ША и ШБ, которые можно использовать для футеровки разливочных и раздаточных ковшей в литейном производстве машиностроительных заводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чернышов Е.А.** Плавильные печи литейных цехов: учеб. пособие Ч. 2. Электрические плавильные печи. Н. Новгород: НГТУ, 2012. 232 с.

2. **Кащеев И.Д., Землячной К.Г.** Производство огнеупоров: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2017. 344 с.

3. **Гладких И.В.** Огнеупорные материалы на основе техногенного сырья для литейно-металлургического производства // Металлургия машиностроения. 2017. № 2. С. 2—5.

4. **Пивинский Ю.Е.** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении: избр. тр. Т. 3. СПб.: Политехника, 2012. 682 с.

5. **Pivinskii Yu.E.** HCBS ceramic concretes in the XXI century — problems and prospects for applying technology in the eld of silicate materials science. Part 1 // Refractories and Industrial Ceramics. 2011. Vol. 52. № 2. P. 107—115.

6. **Тарасова А.П.** Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе. М.: Стройиздат, 1982. 130 с.

7. **Гладких И.В.** Оценка качества техногенного сырья Кузбасса для производства огнеупорных и теплоизоляционных материалов // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 7. С. 13—17.

Инна Васильевна Гладких, канд. техн. наук,
mto@nntu.nnov.ru

zp318.indd 109 20.03.2018 14:18:18

УДК 621.791.9

А.К. Давыдов
(Курганский государственный университет)

Формирование донной части электрошлаковой отливки и наплавленного слоя

Рассмотрены особенности формирования электрошлакового металла в начальной стадии процесса. Показана перспективность применения твердого старта при изготовлении и ремонте штамповой малогабаритной оснастки.

Ключевые слова: электрошлаковый металл; формирование; литье; наплавка; шлаковая и металлическая ванны.

The features of the formation of electroslag metal in the initial stage of the process are considered. The prospects of using solid start in the manufacture and repair of die small-sized equipment is shown.

Keywords: electroslag metal; formation; casting; surfacing; slag and metal baths.

Наведение шлаковой ванны в электрошлаковых технологиях является одним из наиболее сложных и ответственных этапов процесса. Для этой цели применяют: жидкий старт — с заливкой предварительно расплавленного флюса в кристаллизатор (кокиль) и твердый старт — с плавлением флюса непосредственно в технологической оснастке дуговым разрядом с постепенным переходом в электрошлаковом процессе. Каждый из них имеет преимущества и недостатки.

Цель работы — выявление особенностей плавления, кристаллизации металла и затвердевания шлака при твердом и жидком стартах, оптимизация технологии электрошлакового литья (ЭШЛ) и электрошлаковой наплавки (ЭШН) в начальной стадии применительно к изготовлению заготовок штампов и их ремонта.

При жидком старте из условия геометрического подобия шлаковой ванны можно считать, что соотношение теплосодержания (количества теплоты, которое может отдать залитый шлак без критического снижения своей электропроводности), пропорционально 3-й степени линейных размеров, а соотношение тепловых потерь — площади физического контакта с оснасткой и электродом, т.е. 2-й степени линейных размеров. Из этого следует, что увеличение объема шлаковой ванны способствует ее нахождению в полностью жидком виде после заливки, процесс протекает в электрошлаковом режиме, а при малых объемах следует ожидать частичного "подмерзания" флюса, образования настылей на затравочной пластине, наплавляемой детали.

Ранее были предприняты успешные попытки применить при ремонте (наплавке) и изготовлении заготовок штамповой оснастки небольшого типоразмера (до 100 кг) распространенное оборудование для электрошлаковой сварки пластинчатым электродом. Опробованы варианты горизонтальной наплавки изношенной штамповой фигуры плавящимся [1] и неплавящимся (графитовым) электродами с присадкой в виде металлической стружки [2], а также выплавка высокоточных заготовок штампов с припуском 1...2 мм на сторону [3]. Эти технологии были внедрены на Курганском машиностроительном заводе. При этом основными проблемами являлись первоначальное наведение шлаковой ванны, формирование донной части заготовки и сплавление с основным металлом ремонтируемого штампа. В этих работах применен жидкий старт с расплавлением всей порции флюса в специализированной флюсоплавильной печи графитовым электродом, что существенно усложняло технологию и в ряде случаев не обеспечивало необходимое качество продукции. Проблема заключалась в образовании угловых или краевых карманов, заполненых шлаком.

На рис. 1 показано формирование донной части отливки при жидком старте. По-видимому, заливка даже перегретого флюса на холодную подложку или штамп приводит

zp318.indd 110 20.03.2018 14:18:18

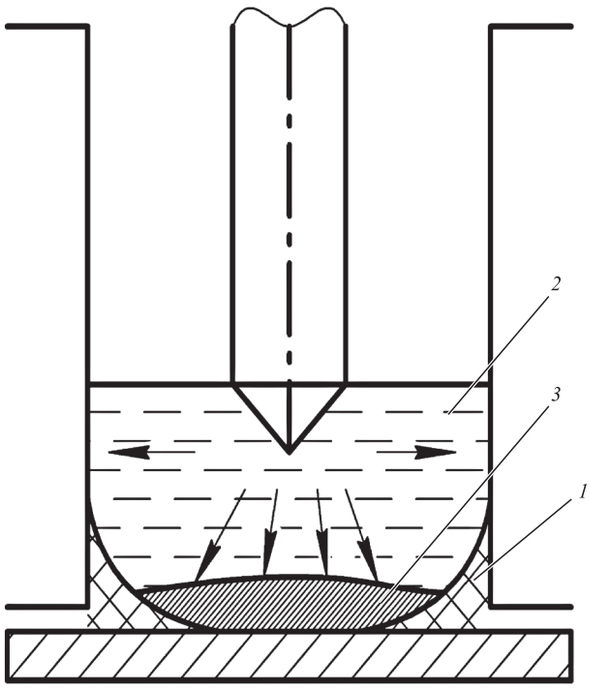


Рис. 1. Формирование донной части отливки и наплавленного слоя при жидком старте

к его первоначальному затвердеванию особенно по углам кристаллизатора с основанием *1*. Он имеет высокую плотность и теплопроводность.

Интенсивно поступающий электродный металл (поскольку процесс практически сразу идет в штатном режиме) быстро закрывает свободную поверхность основания, через которую проходят линии тока *2*, начинает затекать на зоны, покрытые затвердевшим шлаком *3*, но не способен существенно подплавить его. При этом имеет место эффект экранирования жидким металлом шлаковых карманов от расплавленного шлака с более высокой температурой.

При наплавке неплавящимся электродом (с подачей гранулированного присадочного металла) полученный результат изменяется незначительно, поскольку первоначально затвердевший шлак расплавить не удается, так как зона тепловыделения сосредоточена исходно в зоне под электродом, а массивная наплавляемая деталь интенсивно охлаждает периферийно затвердевшие зоны. Таким образом, жидкий старт не является универсальным способом наведения шлаковой ванны, гарантирующим результат в определенных условиях.

В связи с приведенным выше был применен твердый старт, при котором процесс начинается в режиме дугового разряда. При использовании стержневых электродов для стабилизации дуги искусственно уменьшают сечение их концов (заходная часть) проточкой, привариванием элементов [4]. Конструирование заходной части осуществляется индивидуально с использованием экспериментально полученных результатов.

Объект исследования — заготовки пресс-форм для литья под высоким давлением габаритными размерами 600×280×260 мм, площадью сечения основания 44 800 мм^2. Соотношение геометрических размеров заготовки затрудняло получение качественной электрошлаковой заготовки. Электрод из стали 4Х5МФС изготовлен методом литья по газифицируемым моделям, его сечение 232×56 мм, площадь сечения 13 000 мм^2.

Использованы следующие варианты оформления заходных частей электрода:

1) стержни (6 шт.) диаметром 10 мм, равномерно расположенные по оси электрода в виде гребенки;

2) пластины толщиной 5...10 мм.

В итоге был определен оптимизированный вариант комбинированного применения стержней и пластин (рис. 2).

Процесс осуществляли на установке А-550У, запитываемой от трансформатора ТШС-3000.

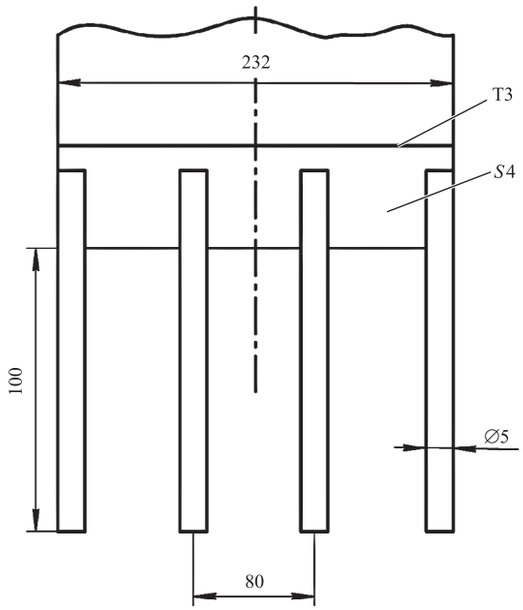


Рис. 2. Схема заходной части электрода:
*S*4 — толщина приваренной пластины; Т3 — тавровое двухстороннее сварное соединение

zp318.indd 111 20.03.2018 14:18:18

Флюс АНФ-6 массой 4 кг с добавкой АН-348 (0,2 кг) предварительно нагревали в сушильном шкафу до температуры 400 °С и подавали всю порцию флюса в кокиль-кристаллизатор. Плавку начинали с короткого замыкания стержней на подложку с применением штатной системы стабилизации тока установки. Процесс в режиме повторно-кратковременного перехода дугового в электрошлаковый продолжался 15 мин с колебаниями тока 1500...3000 А, а затем стабилизировался на уровне 2500...2800 А при напряжении 42 В.

Полученная заготовка имела гарнисаж около 1 мм, обрезь донной части составила 10 мм. При этом средняя часть нижней поверхности имела полное сплавление с подложкой (установлено ультразвуковым контролем).

Результаты исследований позволяют предположить следующий механизм плавления флюса и металла (рис. 3). Расплавившийся первоначально в дуговом режиме даже при кратковременном обрыве дуги флюс *1* остается в электропроводном состоянии. Окружающий зону плавления гранулированный нерасплавившийся флюс *2* удерживает шлаковую и металлическую *3* ванны от растекания, препятствует эффекту экранирования, обеспечивает их тепловую изоляцию от кристаллизатора и затравки (наплавляемой детали), что создает условия для стабильного монотонного роста шлаковой ванны и сплавления электродного металла с подложкой (или основным металлом при ЭШН) и качественного формирования донной части отливки.

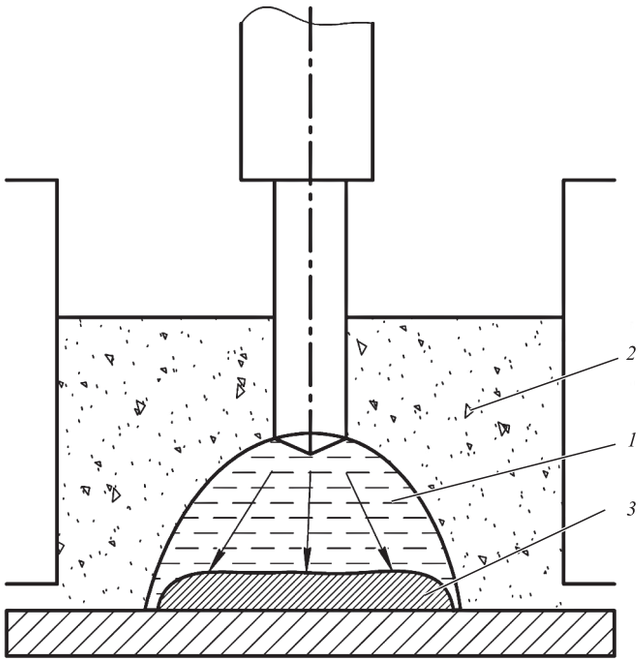


Рис. 3. Формирование донной части отливки при использовании твердого старта

Заключение. Анализ результатов экспериментально-производственной части работы показал, что способ наведения шлаковой ванны во многом предопределяет качество формирования нижней части слитка при ЭШЛ и сплавления при ЭШН.

При выборе технологии старта следует учитывать следующие факторы: химический состав переплавляемого (наплавляемого) металла; физико-химические, теплофизические, металлургические свойства шлаков; энергетический режим процесса, температуру перегрева шлака.

Твердый старт при изготовлении заготовок штамповой оснастки и ее ремонте не уступает жидкому старту и в некоторых случаях превосходит его по качеству продукции, более технологичен, поскольку не требует дополнительно специализированной оснастки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **А. с. 1446795, А1. В23 К25/00.** Способ электрошлаковой сварки и наплавки / А.К. Давыдов, В.В. Марфицын. Заявка № 4201188/31-27 от 02.03.1987.

2. **Электрошлаковая** наплавка графитовым электродом / А.К. Давыдов, А.Е. Гончаров, Г.И. Соловьев, В.В. Марфицын // Сварочное производство. № 6. 1997. С. 47—48.

3. **Применение** электрошлаковых технологий при изготовлении и ремонте штамповой оснастки / А.Е. Гончаров, Г.И. Соловьев, А.К. Давыдов, В.В. Марфицын // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 11. С. 12—14.

4. **Электрошлаковая** сварка и наплавка / под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1980. 511 с.

Александр Константинович Давыдов, канд. хим. наук,
tasp@kgsu.ru

zp318.indd 112 20.03.2018 14:18:18

УДК 621.983.3

В.Н. Чудин
(Российский университет транспорта (МИИТ))

Вытяжка с нагревом конической заготовки для газоформовки оболочки

Рассмотрена вытяжка с нагревом конической заготовки для последующего формообразования полусферической оболочки давлением газа. Предложены соотношения для расчета кинематики, напряжений, сил в условиях вязкопластического деформирования. Использованы условие текучести, уравнение равновесия и уравнение баланса мощностей. Приведены расчетные результаты.

Ключевые слова: вязкопластичность; скорости деформаций; напряжение; мощность; сила.

Drawing with of heating conical billet for the subsequent formation of the hemispherical shell by gas pressure is considered. Relationships to calculate of kinematics, the stress, forces in viscoplastic deformation are offered. Flow condition, the equilibrium equation and power balance equation are used. The calculated results are presented.

Keywords: viscoplasticity; strain rate; stress; power; force.

Эффективным способом изготовления шаровых оболочек емкостей из высокопрочных сплавов является формообразование газом [1, 2]. Недостаток способа в том, что формообразование сопровождается неравномерностью толщины стенки изделия. Один из вариантов уменьшения неравномерности толщины — формообразование оболочки из заготовки, полученной предварительной штамповкой—вытяжкой. Такая заготовка после вытяжки имеет форму конуса с большим углом наклона боковой стенки.

Рассмотрим операцию вытяжки с нагревом конической заготовки. Расчетная схема операции показана на рис. 1. Состояние материала при деформировании примем вязкопластичным в связи с развитием упрочняющих пластических деформаций и разупрочняющих деформаций ползучести. Напряженное состояние заготовки в зоне деформаций — плоское. Для расчета кинематики в этой зоне воспользуемся условием несжимаемости материала и соотношениями для скоростей деформаций [3], т.е.

$$\xi_r + \xi_\varphi + \xi_\delta = 0; \qquad (1)$$

$$\xi_r = \frac{d\varepsilon_r}{dt} = \frac{dv_r}{dr},\ \xi_\varphi = \frac{d\varepsilon_\varphi}{dt} = \frac{dr}{rdt},\ \xi_\delta = \frac{d\varepsilon_\delta}{dt} = \frac{d\delta}{\delta dt}, \qquad (2)$$

где ε_r, ε_φ, ε_δ, ξ_r, ξ_φ, ξ_δ — деформации и их скорости в меридиональном, окружном направлениях и по толщине заготовки соответственно; δ — толщина стенки заготовки текущая; v_r — меридиональная скорость перемеще-

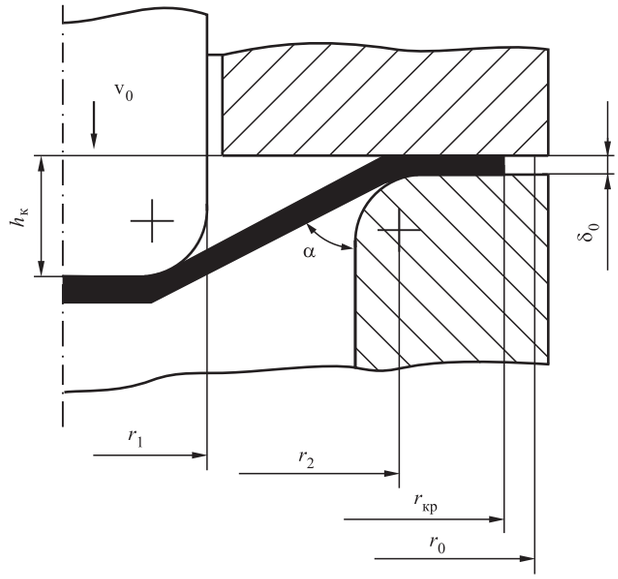


Рис. 1. Расчетная схема вытяжки:

r_0, r_1 — радиусы исходной заготовки и пуансона в поперечном сечении соответственно; r_2 — внутренний радиус фланца; $r_{кр}$ — текущий радиус края фланца; δ_0 — исходная толщина заготовки; α — угол конуса вытягиваемого полуфабриката; v_0 — скорость перемещения пуансона; $h_к$ — конечная высота изделия после вытяжки

zp318.indd 113 20.03.2018 14:18:18

ния точек заготовки; $r_1 \leqslant r \leqslant r_0$ — радиальная координата точки; t — время.

Из условия (1) при учете выражений (2) следует уравнение

$$\frac{d\mathrm{v}_r}{\mathrm{v}_r} = -\frac{dr}{2r}.$$

При граничных условиях $\mathrm{v}_r = \mathrm{v}_0$, $r = r_1$ из этого уравнения получим соотношение для скорости в зоне деформации

$$\mathrm{v}_r = -\mathrm{v}_0 \left(\frac{r_1}{r}\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (3)$$

Используя соотношение (3), можно записать компоненты скоростей деформаций:

$$\xi_r = \xi_\delta = \frac{d\mathrm{v}_r}{dr},\ \xi_\varphi = \frac{\mathrm{v}_r}{r}. \qquad (4)$$

Выражение (4) позволяет представить интенсивности скоростей деформаций и деформаций соотношениями:

$$\xi_i = \mathrm{v}_0 r_1^{\frac{1}{2}} r^{-\frac{3}{2}};$$
$$\varepsilon_i = \int_t \xi_i dt = \int_r^{r_\text{н}} \xi_i \frac{dr}{\mathrm{v}_r} = \ln\frac{r_\text{н}}{r}, \qquad (5)$$

где $r_\text{н}$ — начальная координата точки на плоской заготовке:

$$r_\text{н} = \left(r_0^{\frac{3}{2}} - r_\text{кр}^{\frac{3}{2}} + r^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{2}{3}}. \qquad (6)$$

Интенсивность напряжений при штамповке с нагревом выражается уравнением состояния материала при вязкопластичности [1]. Учитывая соотношения (5), запишем

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m \xi_i^n = A\mathrm{v}_0^n r_1^{\frac{n}{2}} r^{-\frac{3}{2}n} \left(\ln\frac{r_\text{н}}{r}\right)^m, \qquad (7)$$

где A, m, n — константы материала при температуре деформирования.

Для расчета напряжений воспользуемся уравнением равновесия и линейным условием пластичности [4]:

$$r\frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\varphi = 0;$$
$$\sigma_r - \sigma_\varphi = \sigma_i, \qquad (8)$$

где σ_r, σ_φ — компоненты напряжений в меридиональном и окружном направлениях.

Система уравнений (8) при учете выражения (7) и граничных условиях $r = r_\text{кр}$, $\sigma_r = \sigma_\text{тр}$ сводится к уравнению, определяющему меридиональное напряжение в точке в зависимости от радиальной координаты точки

$$\sigma_r = \int_r^{r_\text{кр}} \frac{\sigma_i}{r} dr + \sigma_\text{тр} =$$
$$= A\mathrm{v}_0^n r_1^{\frac{n}{2}} \int_r^{r_\text{кр}} r^{-1-\frac{3}{2}n} \left(\ln\frac{r_\text{н}}{r}\right)^m + \sigma_\text{тр}, \qquad (9)$$

где $\sigma_\text{тр} = \dfrac{\mu Q_\text{пр}}{\pi r_0 \delta_0}$ — напряжение в стенке заготовки, вызванное трением фланца на матрице и прижиме; μ — коэффициент трения; $Q_\text{пр}$ — сила прижима (см. кн.: Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1968. 283 с.).

Окружное напряжение σ_φ определяют из условия пластичности в системе (8).

Максимальное радиальное напряжение вычисляют после интегрирования выражения (9) условием $\sigma_r = (\sigma_r)_\text{max}$ при $r = r_1$.

Толщину заготовки в области деформаций можно вычислить определена с помощью выражения для скорости деформаций по толщине (4), уравнения траектории движения $d_r = \mathrm{v}_r dt$ и зависимости для их скорости (3). Таким образом,

$$d\varepsilon_\delta = \frac{d\delta}{\delta} = \xi_\delta dt = \frac{\mathrm{v}_0}{2\mathrm{v}_r} r_1^{\frac{1}{2}} r^{-\frac{3}{2}} dr = -\frac{dr}{2r}.$$

Отсюда следует, что

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{r_\text{н}}{r}\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (10)$$

Изменение толщины, согласно соотношению (10), не зависит от скорости. Границу зон утолщения и утонения заготовки определяют при $\dfrac{\sigma_r}{\sigma_\varphi} = -1$, что соответствует состоянию растяжения со сжатием при одинаковых модулях напряжений.

Силу вытяжки по ходу операции рассчитывают по выражению (9) при $(\sigma_r)_\text{max}$:

$$Q = 2\pi r_1 \delta_0 (\sigma_r)_\text{max} \cos\alpha. \qquad (11)$$

Получим оценку силы вытяжки энергетическим методом на основе уравнения баланса мощностей [4]

$$N_\text{вн} = Q\mathrm{v}_0 = N_\text{д} + N_\text{тр}, \qquad (12)$$

где $N_\text{вн}$ — мощность внешней силы; $N_\text{д}$, $N_\text{тр}$ — мощности деформаций и трения.

zp318.indd 114 20.03.2018 14:18:19

Мощность деформаций определяют при учете (5) и (7). Ввиду небольшой степени вытяжки изменение толщины не учитывали. Таким образом,

$$N_{д} = \int \sigma_i \xi_i dw = 2\pi\delta_0 \int_{r_1}^{r_{кр}} \sigma_i \xi_i r dr =$$
$$= 2\pi A \delta_0 r_1^{\frac{1}{2}(1+n)} v_0^{1+n} \int_{r_1}^{r_{кр}} r^{-\frac{1}{2}(1+3n)} \left(\ln \frac{r_н}{r}\right)^m dr, \quad (13)$$

где w — объем очага деформаций.

Интегралы (9) и (13) решают аналитически при разложении подынтегральной функции в виде

$$\left(\ln \frac{r_н}{r}\right)^m = \left(\frac{r_н}{r} - 1\right)^m = \left(\frac{r_н}{r}\right)^m \left(1 - \frac{mr}{r_н}\right),$$

где $r_н$ определяют по выражению (6). Напряжение трения фланца заготовки на матрице и прижиме примем в виде

$$\tau_{тр} = \mu q_{пр} = \frac{\mu Q_{пр}}{\pi\left(r_0^2 - r_2^2\right)}, \quad (14)$$

где $q_{пр}$ — давление прижима.

Мощность трения запишем, учитывая выражения (3) и (14), т.е.

$$N_{тр} = 4\pi\tau_{тр} \int_{r_2}^{r_0} v_r r dr = \eta v_0 Q_{пр}, \quad (15)$$

где $\eta = \frac{8\mu r_1^{\frac{1}{2}} r_2^{\frac{3}{2}}}{3\left(r_0^2 - r_2^2\right)} \left[\left(\frac{r_0}{r_2}\right)^{\frac{3}{2}} - 1\right].$

Из уравнения баланса мощностей (12) при подстановке выражений (13), (15) следует, что сила вытяжки

$$Q = \left(\frac{N_д}{v_0} + \eta Q_{пр}\right) \cos\alpha. \quad (16)$$

Соотношение (16), как и (11), позволяет рассчитать силу вытяжки при любом положении края фланца. Сила вытяжки зависит от степени формоизменения и скорости операции.

Расчеты выполнены для вытяжки конической заготовки из титанового сплава ВТ6С при температуре 900 °С. Принято: r_0 = 150 мм; r_1 = 35 мм; δ_0 = 2 мм; $h_к$ = 30 мм; α = 45...50°; μ = 0,15. Для расчета использованы константы материала по данным работы [1].

На рис. 2 приведены значения давления $q = Q/2\pi r_1\delta_0$ в зависимости от текущей относительной высоты изделия $h/h_к$. Утонение материала у кромки пуансона не превышало 5...7 % и зависело от силы прижима. Из рис. 2 следует, что максимум давления соответствует относительной высоте изделия 0,25...0,35. Давление снижается при уменьшении скорости операции. Энергетический расчет завышает значения давления относительно расчета по напряжениям. Возможное появление на конической поверхности заготовки продольных складок устраняется последующей газоформовкой оболочки.

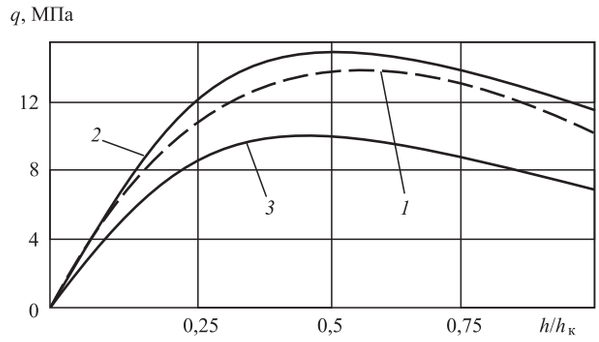


Рис. 2. Зависимости давления *q* от текущей относительной высоты изделия $h/h_к$:

1 — по формуле (11) при v_0 = 0,2 м/с; *2*, *3* — по формуле (16) при v_0 = 0,2 и 0,1 м/с соответственно

Выводы

1. Напряжения и силы при вытяжке с нагревом снижаются при уменьшении скорости операции. На уменьшение силы влияет также увеличение угла конусности изделия.

2. Толщина материала на конической стенке изделия существенно не отличается от исходной толщины заготовки и не зависит от скорости вытяжки, что позволяет использовать данную операцию как предварительную для газоформовки оболочки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Изотермическое** формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

2. **Чудин В.Н., Соболев Я.А.** Формоизменение газом оболочек емкостей // Технология машиностроения. 2015. № 4. С. 18—21.

3. **Чудин В.Н.** Вязкопластическое деформирование анизотропной трубы коническим инструментом // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 7. С. 13—16.

4. **Теория** обработки металлов давлением / В.А. Голенков и др. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

Владимир Николаевич Чудин, д-р техн. наук,
vladimir-chudin@yandex.ru

zp318.indd 115 20.03.2018 14:18:19

УДК 621.7.043, 539.376

А.В. Черняев, В.А. Гладков
(Тульский государственный университет)

Расчетная модель выдавливания внутреннего фланцевого утолщения на трубе

Предложены соотношения для расчета технологических параметров радиального выдавливания внутренних кольцевых утолщений на цилиндрической пустотелой заготовке. Горячий материал в зоне деформаций принят вязкопластичным. Использован верхнеграничный метод расчета применительно к осесимметричному полю скоростей перемещений. Даны зависимости для расчета кинематики, давления, сплошности материала.

Ключевые слова: радиальное выдавливание; вязкопластичный материал; мощность; давление; сплошность; повреждаемость.

The ratios for calculation of technological parameters of radial extrusion of internal ring thickenings on cylindrical hollow blank are offered. The hot material in zone of deformations is accepted viscoplastic. The upper-boundary calculation method in relation to axisymmetric velocity field of displacements is used. Dependences for calculation of kinematics, pressure and denseness of material are presented.

Keywords: radial extrusion; viscoplastic material; power; pressure; denseness; damageability.

Процессы изотермического выдавливания широко применяют при производстве деталей сложной формы из труднодеформирумых малопластичных материалов. В энергетическом машиностроении детали трубопроводов могут иметь местные утолщения или фланцы. Эти элементы рационально изготовлять по технологии радиального выдавливания. Процесс реализуется в регламентированных температурно-скоростных условиях на гидропрессовом оборудовании.

Рассмотрим процесс радиального выдавливания внутреннего фланца на толстостенной трубе. Расчетно-технологическая схема процесса показана на рис. 1, *а*. Для расчета параметров технологии используем верхнеграничный метод с привлечением разрывного поля скоростей перемещений [1, 2]. Поле приведено на схеме процесса. Оно кинематически допустимо и состоит из жестких блоков "0" и блока деформации "1". Блоки разделяются поверхностями разрыва скорости (образующие линии "01" в продольном сечении заготовки). Блок "1" перемещается по контактным поверхностям штампа. Деформации возникают в блоке "1", на поверхностях разрыва скорости и поверхностях трения. Схема деформации — осевая симметрия.

Установим кинематику деформирования, используя план скоростей (см. рис. 1, *б*) для верхней части заготовки, симметричной относительно оси *y*.

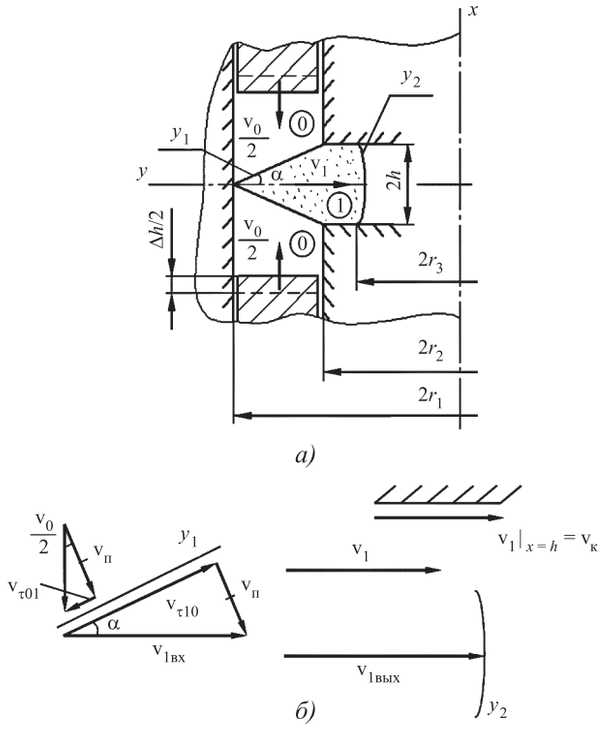


Рис. 1. Расчетная схема процесса радиального выдавливания, поле (*а*) и план скоростей (*б*)

zp318.indd 116 20.03.2018 14:18:19

Скорость перемещений точек в блоке деформаций зададим функцией

$$\mathrm{v}_1 = \frac{\mathrm{v}_0}{2}\left[1 + \frac{k\left(y - y_1\right)}{y_1 - y_2}\right]\mathrm{ctg}\,\alpha, \qquad (1)$$

где v_0 — двухсторонняя скорость пуансона;

$$k = 1 - \frac{r_1^2 - r_2^2}{2r_3 h}\,\mathrm{tg}\,\alpha,$$

где r_1, r_2 — наружный и внутренний радиусы трубной заготовки; r_3 — радиус штампуемого внутреннего фланцевого утолщения; h — односторонняя высота внутреннего фланцевого утолщения; α — угол наклона линии разрыва скорости к оси y; y_1, y_2 — уравнения образующих поверхностей разрыва скорости и свободного контура блока.

Функция (1) удовлетворяет условиям на границах блока деформаций:

$$\mathrm{v}_{1\text{вх}} = \frac{\mathrm{v}_0}{2}\mathrm{ctg}\,\alpha \ \text{ при } \ y = y_1 = r_1 - x\,\mathrm{ctg}\,\alpha;$$

$$\mathrm{v}_{1\text{вых}} = \frac{\mathrm{v}_0\left(r_1^2 - r_2^2\right)}{4r_3 h} \ \text{ при } \ y = y_2 = r_3,$$

где $\mathrm{v}_{1\text{вх}}$, $\mathrm{v}_{1\text{вых}}$ — скорости на входе в блок и выходе из него. Составляющие скорости по осям координат и компоненты скоростей деформаций в этом блоке соответственно:

$$\left.\begin{aligned}
&\mathrm{v}_{1x} = 0;\ \ \mathrm{v}_{1y} = \mathrm{v}_1;\\
&\xi_x = \frac{\partial \mathrm{v}_{1x}}{\partial x} = 0;\ \ \xi_y = -\xi_\varphi = \frac{\partial \mathrm{v}_{1y}}{\partial y} = \frac{\partial \mathrm{v}_1}{\partial y};\\
&\xi_{xy} = \frac{\partial \mathrm{v}_{1x}}{\partial y} + \frac{\partial \mathrm{v}_{1y}}{\partial x} = \frac{\partial \mathrm{v}_1}{\partial x}.
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Компоненты скорости (2) позволяют записать эквивалентные скорость деформаций и деформацию:

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}}\left[\left(\frac{\partial \mathrm{v}_1}{\partial x}\right)^2 + 4\left(\frac{\partial \mathrm{v}_1}{\partial y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}; \qquad (3)$$

$$\varepsilon_e = \xi_e t = \frac{\Delta h}{\mathrm{v}_0}\xi_e, \qquad (4)$$

где Δh — двухсторонний рабочий ход; t — время операции.

Эквивалентные напряжения в блоке деформаций выразим, используя уравнение состояния материала при вязкопластичности [1, 3]:

$$\sigma_e = A\varepsilon_e^m \xi_e^n = A\left(\frac{\Delta h}{\mathrm{v}_0}\right)^m \xi_e^{m+n}, \qquad (5)$$

где A, m, n — константы материала.

Отметим, что холодной и обычной горячей штамповке соответствует уравнение (5) при $n = 0$. Выражения (3) и (5) позволяют представить мощность в блоке деформаций в виде

$$N_1 = \int \sigma_e \xi_e dW = 2\pi A\left(\frac{\Delta h}{\mathrm{v}_0}\right)^m \times$$
$$\times \int_0^h \left[y_{1\,\text{ц.т}} \int_{r_2}^{r_1} \xi_e^{1+m+n} dy + y_{2\,\text{ц.т}} \int_{r_3}^{r_2} \xi_e^{1+m+n} dy\right] dx, \qquad (6)$$

где W — объем блока деформаций; $y_{1\,\text{ц.т}} = r_2 + \frac{1}{3}\left(r_1 - r_2\right)$ — ордината центра тяжести треугольной площади блока деформаций; $y_{2\,\text{ц.т}} = \frac{1}{2}\left(r_2 + r_3\right)$ — ордината центра тяжести прямоугольной площади блока деформаций.

На поверхности разрыва скорости в соответствии с планом скоростей имеем касательную скорость

$$\mathrm{v}_\tau = \mathrm{v}_{\tau 01} + \mathrm{v}_{\tau 10} = \frac{\mathrm{v}_0}{2}\left(1 + \mathrm{ctg}^2\,\alpha\right)\sin\alpha. \qquad (7)$$

Эквивалентные деформацию, скорость деформаций и напряжение определим, учитывая зависимость (7) и уравнение состояния (5):

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon_e = \frac{2\Delta h \mathrm{v}_\tau}{\sqrt{3}\mathrm{v}_0 l_{01}} = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}h}\left(1 + \mathrm{ctg}^2\,\alpha\right)\sin^2\alpha;\\
&\xi_e = \frac{\mathrm{v}_0}{\Delta h}\varepsilon_e;\\
&\sigma_e = A(\Delta h)^m \mathrm{v}_0^n\left[\frac{1}{\sqrt{3}h}\left(1 + \mathrm{ctg}^2\,\alpha\right)\sin^2\alpha\right]^{m+n},
\end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

где l_{01} — линия разрыва скорости между блоками "0" и "1".

Мощность на одной поверхности разрыва скорости выразим, используя соотношения (7), (8):

$$N_\text{р} = \frac{1}{\sqrt{3}}\int \sigma_e \mathrm{v}_\tau ds = \frac{\pi A\left(r_1 + r_2\right)(\Delta h)^m}{2h^{m+n-1}}\mathrm{v}_0^{1+n} \times$$
$$\times\left(\frac{1 + \mathrm{ctg}^2\,\alpha}{\sqrt{3}}\right)^{1+m+n}(\sin\alpha)^{2(m+n)}, \qquad (9)$$

где s — площадь поверхности разрыва, образованной вращением линии разрыва l_{01} вокруг вертикальной оси.

Напряжение трения примем в виде

$$\tau_\text{тр} = \mu q, \qquad (10)$$

где μ — коэффициент трения на контактных границах инструмента и заготовки; q — давление операции.

zp318.indd 117 20.03.2018 14:18:19

Скорость перемещения материала по контактной поверхности матрицы

$$v_к = v_1 \text{ при } x = h \tag{11}$$

при расчете по выражению (1).

Мощность трения блока деформации на одной из контактных поверхностей вычислим, учитывая выражения (10), (11):

$$N_{тр} = 2\pi y_{ц.т}\tau_{тр}\int_{r_3}^{r_2} v_1\big|_{x=h}\,dy = \\ = \pi\mu q\left(r_2 + r_3\right)\int_{r_3}^{r_2} v_1\big|_{x=h}\,dy. \tag{12}$$

Мощность внешних сил данного процесса

$$N = \pi q\left(r_1^2 - r_2^2\right)\frac{v_0}{2}. \tag{13}$$

Давление операции определим на основе энергетического верхнеграничного уравнения равновесия [2] с помощью выражений (6), (9), (12), (13):

$$q \leqslant \frac{2\left(N_1 + N_р\right)}{\pi\left[\left(r_1^2 - r_2^2\right)v_0 - 2\mu\left(r_2 + r_3\right)\int_{r_3}^{r_2} v_1\big|_{x=h}\,dy\right]}. \tag{14}$$

Оценку повреждаемости материала заготовки в процессе деформирования сделаем по уравнениям кинетики повреждаемости [1] для краевых точек фланца (рис. 2). При плоской деформации:

$$\sigma_\varphi = -\sigma_e,\ \sigma_x = -\frac{1}{2}\sigma_\varphi,\ \sigma_r = 0, \\ \varepsilon_r = -\varepsilon_\varphi,\ \varepsilon_x = 0,\ \varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{t}{t_к}\ln\frac{r_2}{r_3}; \tag{15}$$

$$\xi_e = \frac{2}{\sqrt{3}t_к}\ln\frac{r_2}{r_3}; \tag{16}$$

$$\sigma_e = A\left(\frac{2}{\sqrt{3}t_к}\ln\frac{r_2}{r_3}\right)^{m+n} t^m, \tag{17}$$

где σ_φ, σ_x, σ_r и ε_φ, ε_x, ε_r — напряжения σ и деформации ε в окружном, осевом и радиальном направлениях соответственно; $t_к$ — конечное время операции.

По энергетическому уравнению, учитывая выражения (15)—(17), получаем

$$\psi = 1 - \omega = 1 - \frac{At_к^{-n}}{A_{пр}(1+m)}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{r_2}{r_3}\right)^{1+m+n}, \tag{18}$$

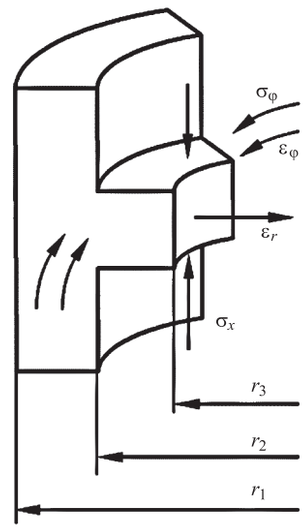


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние на краю фланца

по деформационному уравнению

$$\psi = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{eпр}} = 1 - \frac{2}{\sqrt{3}\varepsilon_{eпр}}\ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right), \tag{19}$$

где $1 \geqslant \psi \geqslant 0$ — сплошность материала; $0 \leqslant \omega \leqslant 1$ — повреждаемость; $\varepsilon_{e\,пр}$, $A_{пр}$ — предельные значения эквивалентной деформации и удельной работы разрушения материала.

Полную повреждаемость определяем при $\psi = 0$, что соответствует критическим условиям формообразования, т.е.

$$\frac{r_2}{r_3} = \exp\left\{\frac{\sqrt{3}}{2}\left[\frac{A_{пр}}{A}(1+m)t_к^n\right]\right\}^{\frac{1}{1+m+n}}; \tag{20}$$

$$\frac{r_2}{r_3} = \exp\frac{\sqrt{3}}{2}\varepsilon_{eпр}. \tag{21}$$

Соотношения (18) и (20) применимы для материалов, повреждаемость которых зависит от времени (скорости) деформирования, соотношения (19) и (21) — для материалов, у которых этой зависимости нет. Для расчета сплошности (повреждаемости) материала константы в зависимостях (18)—(21) вычисляем для вязкопластического деформирования по выражениям [1]:

$$A_{пр} = C_1\exp\left(A_1\frac{\sigma_0}{\sigma_e}\right);\ \varepsilon_{eпр} = C_2\exp\left(A_2\frac{\sigma_0}{\sigma_e}\right),$$

zp318.indd 118 20.03.2018 14:18:19

где σ_0 — среднее напряжение в рассматриваемой точке; C_1, C_2, A_1, A_2 — константы материала при данной температуре.

Для данной схемы выдавливания в соответствии с рис. 2 запишем

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}\left(\sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_x\right) = -\frac{1}{2}\sigma_e, \ \frac{\sigma_0}{\sigma_e} = -\frac{1}{2}.$$

Расчеты выполнены для выдавливания внутренних фланцевых утолщений на толстостенном цилиндрическом корпусе из титанового сплава ВТ6С при температуре 930 °С и алюминиевого сплава АМг6 при 450 °С. Приняты размеры: r_1 = 100 мм; r_2 = 90 мм; r_3 = 82 мм; h = 5 мм для условий вязкопластичности. Значения констант приведены в таблице.

Константы уравнений состояния и разрушения

Сплав	T, °С	A, МПа·с^n	m	n	$A_{пр}$, МПа	$\varepsilon_{e пр}$
АМг6	450 ± 2	50	0,1	0,025	2050	—
ВТ6С	930 ± 2	45	0,03	0,06	—	1,274

На рис. 3 приведены зависимости давления процесса радиального выдавливания от конечного времени операции и сплошности материала на свободной цилиндрической поверхности утолщения при конечном двухстороннем ходе Δh = 7 мм.

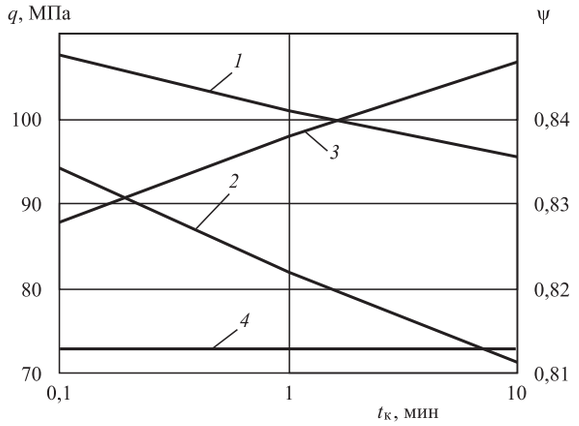


Рис. 3. Зависимости давления процесса радиального выдавливания q и сплошности материала ψ от конечного времени операции $t_к$ для сплавов АМг6 (*1*, *3*) и ВТ6С (*2*, *4*) при μ = 0,2:

1, *2* — q; *3*, *4* — ψ

Из расчетов и зависимостей следует, что при увеличении длительности процесса давление уменьшается. Сплошность сплава АМг6 также зависит от времени операции: чем она меньше, тем время больше. Для сплава ВТ6С конечная сплошность определяется только степенью формообразования. Высокие значения сплошности связаны со схемой всестороннего сжатия во фланце заготовки. В работе [3] приведены результаты расчета по схеме плоской деформации.

Выводы

1. При реализации процессов изотермического радиального выдавливания материал проявляет вязкие свойства, что обеспечивает снижение давления при уменьшении скорости операции и, соответственно, при увеличении ее длительности.

2. Для материалов, разрушение которых описывается энергетическим критерием, накопленная в процессе деформирования повреждаемость зависит от степени формоизменения и скорости операции, для материалов, разрушение которых описывается деформационным критерием, — только от степени формоизменения.

3. Выдавливание внутреннего утолщения происходит при сжимающих напряжениях, что также способствует малой потере сплошности материала заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Изотермическое** формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

2. **Гун Г.Я.** Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности): учебник для вузов / под ред. П.И. Полухина. М.: Металлургия, 1980. 456 с.

3. **Черняев А.В., Чудин В.Н., Гладков В.А.** Вариационная оценка режима плоского радиального выдавливания // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 10. С. 31—34.

Алексей Владимирович Черняев, д-р техн. наук,
sovet01tsu@rambler.ru;
Вячеслав Александрович Гладков

zp318.indd 119 20.03.2018 14:18:19

УДК 67.02

А.В. Мунтин
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Е.А. Солдатов
(АО "Выксунский металлургический завод")

Современное оборудование для охлаждения горячекатаной полосы на отводящем рольганге непрерывных широкополосных станов и литейно-прокатных комплексов

Рассмотрены основные способы охлаждения горячекатаной полосы на отечественных и зарубежных непрерывных широкополосных станах и литейно-прокатных комплексах. На основании данных по влиянию условий охлаждения проката на механические свойства показана актуальность модернизации существующего оборудования и автоматизации на отводящем рольганге. Особое внимание уделено системам интенсивного охлаждения и общей эффективности от их использования.

Ключевые слова: непрерывные широкополосные станы; горячекатаный прокат; интенсивное охлаждение; легирование водой; механические свойства.

The main cooling methods of hot-rolled strip on domestic and foreign continuous broadband mills and casting and rolling complexes are considered. The actuality of the modernization of existing equipment and automation within the boundaries of the outgoing roller table is shown based on the data on the influence of the cooling conditions of rolled products on mechanical properties. Particular attention is paid to the intensive cooling systems and the overall efficiency from their use.

Keywords: continuous broadband mills; hot-rolled steel; intensive cooling; water alloying; mechanical properties.

Введение. Эффект от применения ускоренного охлаждения горячекатаных полос при прокатке на непрерывных широкополосных станах (НШПС) хорошо известен и изучен многими исследователями в последние десятилетия.

Во-первых, ускоренное охлаждение полосы позволяет снизить температуру смотки и избежать нежелательной просадки рулонов при их дальнейшем охлаждении на образующей. Во-вторых, ускоренное охлаждение по сравнению с охлаждением на воздухе позволяет сократить длину отводящего рольганга при той же температуре смотки. В-третьих, применение ускоренного охлаждения позволяет управлять микроструктурой и механическими свойствами готового проката [1]. Использование охлаждения совместно с контролируемой прокаткой позволяет получить рулонный прокат класса прочности X70 (K60) толщиной 10...16 мм [2].

В России все станы оснащены системами охлаждения полосы [3]. При этом их модернизация продолжается в направлениях совершенствования оборудования и его автоматизации, что оказывает влияние на технологию контролируемого охлаждения. Совершенствование и разработка новых технологических приемов позволяют расширить сортамент станов, снизить себестоимость продукции и в отдельных случаях создать рулонный прокат с уникальным комплексом свойств.

Одной из мировых тенденций в модернизации систем охлаждения полосы на НШПС

zp318.indd 120 20.03.2018 14:18:19

является установка интенсивных секций охлаждения, или Ultra Fast Cooling [4, 5]. Подобные установки позволяют увеличить скорость охлаждения полосы в несколько раз и, как следствие, измельчить структуру готового проката, повысить механические свойства при испытании на растяжение и вязкость стали. Также увеличение скорости охлаждения позволяет снизить количество легирующих элементов и себестоимость продукции. Это становится особенно важно в рамках сложившейся экономической ситуации в отрасли, когда оптимизация расходов на производство стальной продукции является актуальной задачей и одним из ключевых факторов успешности любой металлургической компании.

Цель работы — анализ мирового опыта использования установок интенсивного охлаждения горячекатаной полосы в условиях традиционных непрерывных широкополосных станов и литейно-прокатных комплексов (ЛПК).

Обзор систем охлаждения полосы. Среди установок охлаждения полосы наиболее распространено применение коллекторов с U-образными трубками. Принципиальная схема такого коллектора показана на рис. 1, *а*. Массив трубок обеспечивает высокоэффективное точечное охлаждение по поперечному направлению проката за счет ламинарных струй. При этом регулировка интенсивности осуществляется, как правило, дискретно, т.е. включением или выключением отдельного коллектора, а расход является постоянным.

Среди преимуществ систем охлаждения с коллекторами U-tube можно выделить относительную простоту исполнения, а также простоту автоматизированного управления. К их недостатку относят высокую чувствительность к качеству (чистоте) воды (особенно при малых диаметрах трубок). Диаметр трубок составляет от 8 до 16 мм. Подобные установки предлагают все основные производители прокатного оборудования в мире. Коллекторы с U-образными трубками также установлены на большинстве НШПС в России [6, 7].

Также в установках охлаждения полосы применяют систему Water Wall компании

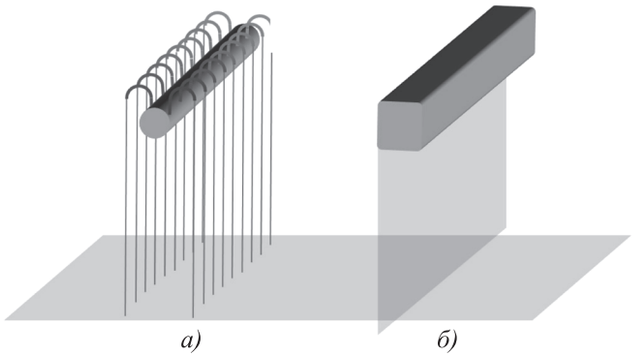


Рис. 1. Ламинарные установки охлаждения полосы:
а — с коллекторами U-tube; *б* — с коллекторами Water Wall

Danieli (Италия) (рис. 1, *б*). В России такая система охлаждения установлена только на стане 1950 ЛПК Выксунского металлургического завода. Конструктивно коллектор представляет собой металлический короб с длинным щелевым отверстием перпендикулярно направлению прокатки, из которого вода поступает ламинарной стеной (завесой) на полосу. Толщину щели выбирают так, чтобы обеспечить ламинарный поток в заданном интервале расходов воды, она может составлять 6...12 мм.

Преимуществами систем охлаждения с коллекторами Water Wall являются высокая равномерность охлаждения по ширине полосы, меньшая требовательность к качеству воды, простое обслуживание, надежность. К их недостаткам можно отнести более сложное управление (регулировку), наличие минимально возможного расхода (около 30 % от максимального), однако при наличии качественной системы автоматизации этот недостаток может быть устранен. Также известно, что система охлаждения типа Water Wall более сложна для моделирования процесса охлаждения из-за наличия очень узкого участка водяного охлаждения и большого промежутка воздушного охлаждения между коллекторами. В целом эффективность охлаждения с помощью U-tube и Water Wall сопоставима.

Необходимость повышения скорости охлаждения полосы может быть обеспечена использованием тех же конструктивных принципов. Так, интенсивные системы охлаждения на базе U-tube подразумевают более частую

zp318.indd 121 20.03.2018 14:18:19

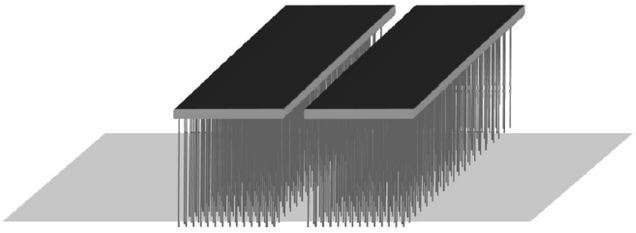


Рис. 2. Условная схема коллекторов интенсивного охлаждения

установку коллекторов, а также увеличение числа трубок на одном коллекторе. В системе Water Wall между коллекторами стандартного охлаждения достаточно места для установки дополнительных коллекторов.

Однако применение данного варианта повышения эффективности охлаждения имеет определенные ограничения, в связи с чем проведены разработки более эффективных типов охлаждения иной конструкции. Одной из первых работ по созданию коллекторов интенсивного охлаждения является исследование [4, 5], выполненное в рамках европейского гранта в начале 2000-х гг. В работе показана эффективность применения интенсивных секций охлаждения, а также описаны конструктивные особенности новой установки. В настоящее время наибольшее распространение получили системы охлаждения полосы, разработанные компаниями SMS Group и Primetals.

Интенсивное охлаждение компании SMS Group имеет название Compact Cooling [8]. Конструктивно представляет собой плиты с отверстиями (рис. 2). Скорость охлаждения может достигать ≈50 °С/с для толщины полосы 12 мм, а прирост механических свойств — 30 МПа для трубных сталей класса прочности К60 (Х70). Интенсивное охлаждение компании Primetals (Siemens VAI) имеет название Power Cooling [9, 10]. Конструктивно представляет собой коллекторы с форсунками, из которых подается вода под высоким давлением. Power Cooling позволяет достигать скорости охлаждения 74 и 40 °С/с для толщины полосы 12,2 и 25,4 мм соответственно.

На основании анализа характеристик оборудования различных производителей построена зависимость скорости охлаждения от толщины полосы (рис. 3).

Учитывая быстрое охлаждение, которое реализуется на небольшой длине, не требуется установка интенсивных секций на всей длине отводящего рольганга. Поэтому существует два возможных места установки подобных секций. Первый вариант предусматривает установку интенсивных секций в начало отводящего рольганга, что позволяет сформировать в стали при охлаждении бейнитную или феррито-бейнитную структуру с более дисперсным зерном по сравнению с обычным ламинарным охлаждением. Данный вариант является эффективным способом реализации так называемого принципа "легирования водой".

Второй вариант подразумевает установку интенсивных секций в конце отводящего рольганга и направлен на создание двухфазных или мультифазных структур, когда наряду с достаточно крупным ферритным зерном, сформировавшимся предварительно при низкой скорости охлаждения на воздухе, формируется вторая более твердая фаза мартенсита или остаточного аустенита в результате интенсивного охлаждения не превращенного объема высокотемпературного аустенита. В данном случае необходимо применение низких температур смотки полосы (менее 300 °С), что не всегда осуществимо на действующем оборудовании, требуется длинный отводящий рольганг (обычно не менее 120 м). Интенсивные секции охлаждения можно устанавливать одновременно в начале и в конце отводящего рольганга, что повышает гибкость режимов охлаждения полосы.

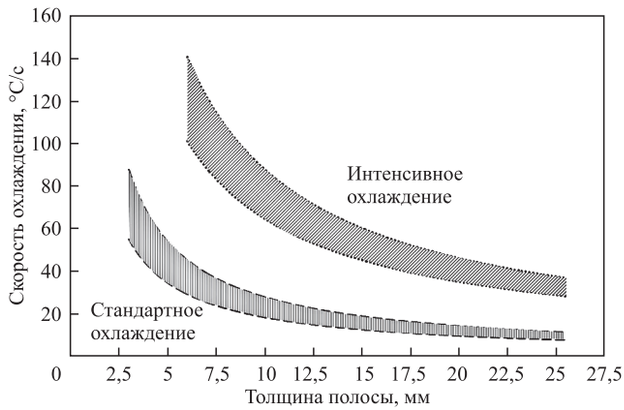


Рис. 3. Максимальные скорости охлаждения полосы на участках отводящего рольганга

zp318.indd 122 20.03.2018 14:18:19

1. Установки интенсивного охлаждения полосы, установленные на различных предприятиях

Предприятие (страна)	Производитель	Тип охлаждения	Год пуска	НШПС/ЛПК	Место установки
Handan Iron&Steel [8] (Китай)	SMS Group	Compact Cooling	2005	НШПС	Нет сведений
Lianyan Iron&Steel [8] (Китай)			2001	ЛПК	
Maanshan Iron&Steel [8] (Китай)			2001		
ThysenKrupp Steel (Bruckhausen) [8] (Германия)			1999		Начало отводящего рольганга
ThysenKrupp Steel (Bruckhausen) [11, 12] (Германия)	Siemens VAI (Primetals)	Power Cooling	2011	НШПС	
ThysenKrupp Steel (Beeckerwerth) [9] (Германия)			2010		
Wuhan Iron & Steel (WISCO) [9, 13] (Китай)			2015		
Qian'an Iron & Steel [14] (Китай)	Нет сведений	Нет сведений	Нет сведений		
Baotou Iron & Steel [15] (Китай)	Sinosteel		2013	ЛПК	Конец отводящего рольганга
Baotou Iron & Steel [15] (Китай)	Нет сведений		Нет сведений	НШПС	Начало отводящего рольганга
Panzhihua Iron&Steel [16] (Китай)					
Sabic Hadeed (Саудовская Аравия)	Sinosteel				
NKK [17] (Япония)	NKK	Super-OLAC	2002		

Применение интенсивного охлаждения на различных заводах. В табл. 1 приведена информация по некоторым установкам интенсивного охлаждения различных НШПС и ЛПК в мире. Наибольшее число установок интенсивного охлаждения полосы установлено в Китае. В Германии реализовано как минимум три подобных решения на станах компании ThyssenKrupp. В основном это установки интенсивного охлаждения компаний SMS Group (Compact Cooling) и Primetals (Power Cooling). На некоторых станах установлено японское оборудование Super-OLAC и оборудование компании Sinosteel.

Система Compact Cooling установлена на непрерывном широкополосном стане литейно-прокатного комплекса завода ThyssenKrupp (Дуйсбург, Германия). Ее главными преимуществами являются компактность, возможность получения тонких полос с многофазной структурой, высокие скорости охлаждения до 400 °С/с, простота в обслуживании. Суммарный расход воды при давлении 0,35 МПа (3,5 бар) для этой установки составляет 5000...12 000 м^3/ч. Точность регулирования температуры полосы ±18 °С. Время, требуемое для перехода в устойчивый поток воды при переключении клапанов системы, менее 0,7 с. Сразу после интенсивного охлаждения установлена выдвигающаяся моталка, которая сматывает тонкие полосы после очень быстрого охлаждения до низкой температуры.

zp318.indd 123 20.03.2018 14:18:19

Система Power Cooling сочетает в себе преимущества обычного ламинарного охлаждения и ускоренного с возможной регулировкой от 10 до 100 % максимального давления. В 2014 г. на стане НШПС завода ThyssenKrupp (Дуйсбург, Германия) проведена модернизация данной установки [11]. Общее число секций охлаждения увеличено до 32, что сравнимо с аналогичной системой, установленной на заводе Wuhan Iron & Steel (Китай).

Зона интенсивного охлаждения начинается сразу после выхода из чистовой группы клетей и расширяет систему ламинарного охлаждения. Ее длина составляет 18,5 м. Максимальный расход воды при давлении 0,3 МПа (3 бар) — 9000 м^3/ч. Power Cooling состоит из верхних и нижних коллекторов охлаждения, которые индивидуально регулируются по расходу воды, также для минимизации возможных проблем при выходе полосы из чистовой группы на высоких скоростях может регулироваться их высота.

В случае производства стандартных марок стали коллекторы работают при низких расходах воды в соответствии с необходимой скоростью охлаждения. Для охлаждения высокопрочных сталей класса прочности Х70—Х100 верхние коллекторы опускаются, чтобы повысить эффективность охлаждения. Основной задачей установки является обеспечение требования при испытании падающим грузом для толщин полосы 20...25,4 мм за счет интенсивного охлаждения и формирования мелкодисперсной бейнитной структуры.

Система Super-OLAC (Япония) появилась в 2002 г. На ранних этапах ввод их в эксплуатацию сопровождался рядом технических трудностей, основная из которых — низкая интенсивность охлаждения при прокатке тонкого горячекатаного рулонного проката. В настоящее время на НШПС компании NKK обеспечивается точность охлаждения на скоростях свыше 19 м/с. Главные отличительные особенности данной системы от описанных выше — отсутствие зоны ламинарного охлаждения после ускоренного, что сокращает общую длину производственной линии, а также большие скорости охлаждения до 700 °С/с для полосы толщиной 3 мм, что является лучшим показателем в мире [17].

Автоматизированное управление интенсивными секциями охлаждения. Вопросы автоматизации процесса интенсивного охлаждения рассмотрены во многих работах, например в [16, 18]. Большинство традиционных систем ламинарного охлаждения делится на два участка водяного охлаждения: основные коллекторы и участок доводки температуры (триммингoвая зона). Триммингoвая зона осуществляет тонкую регулировку температуры смотки на основе обратной связи от пирометра перед моталкой. Такая система контроля способна быстро реагировать на любые отклонения температуры вдоль отводящего рольганга вследствие изменения скорости полосы, толщины полосы на чистовом стане, колебания температуры в чистовой группе клетей, изменения температуры воды.

При использовании стандартной схемы равномерного ламинарного охлаждения на всей длине отводящего рольганга данный тип управления является рациональным, так как триммингoвая зона является естественным продолжением основного охлаждения.

Использование интенсивного охлаждения, как правило, подразумевает окончание охлаждения водой задолго до моталки и даже триммингoвой зоны в силу высоких скоростей охлаждения и раннего достижения требуемой

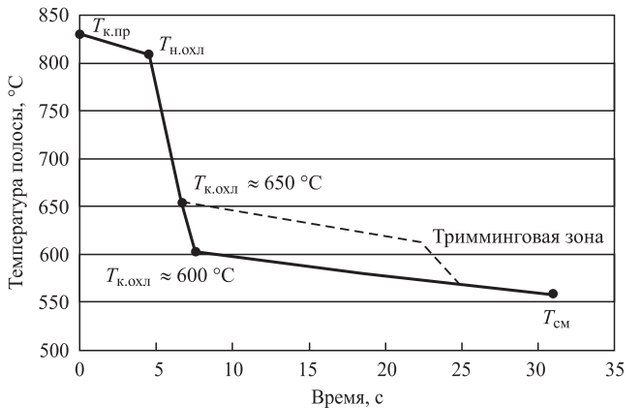


Рис. 4. Варианты использования интенсивного охлаждения:

$T_{к.пр}$ — температура конца прокатки; $T_{н.охл}$, $T_{к.охл}$ — температура начала и конца охлаждения; $T_{см}$ — температура смотки

zp318.indd 124 20.03.2018 14:18:19

Рис. 5. Схема обратной связи для интенсивных секций охлаждения

температуры окончания охлаждения (рис. 4). В таком случае наличие дополнительного охлаждения коллекторами триммингoвой зоны не является целесообразным с точки зрения получения требуемых структуры и свойств.

Для реализации более рациональной схемы управления интенсивным охлаждением устанавливают дополнительный пирометр после интенсивных секций (рис. 5). Регулировка охлаждения по обратной связи от этого пирометра может осуществляться последним коллектором системы интенсивного охлаждения или первым следующим коллектором ламинарного охлаждения.

Влияние интенсивного охлаждения на механические свойства. В работах [16, 18, 19] приведены результаты исследования влияния интенсивного охлаждения на механические свойства готового проката из сталей с невысокими значениями предела текучести и временного сопротивления, например стали Q235B (аналог Ст2, Ст3 по ГОСТ 380). При этом не всегда подробно описаны режимы охлаждения на отводящем рольганге. На рис. 6 представлены данные о влиянии охлаждения на механические свойства стали Q235B из различных публикаций.

В докладе специалистов Primetals [20] показано, что применение системы Power Cooling по сравнению со стандартной Laminar Cooling при снижении марганца в стали с 1,5 до 0,5 % позволяет уменьшить твердость на 7 HV (21 МПа) (табл. 2). В случае использования обычного охлаждения при равнозначном снижении количества легирующих элементов падение твердости составляет 20...23 HB (≈70 МПа).

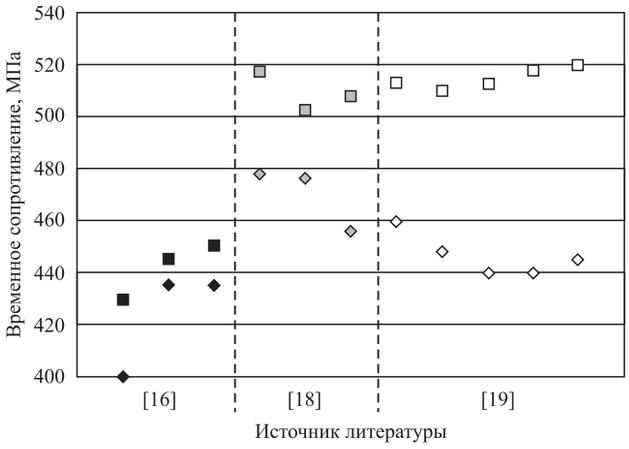


Рис. 6. Влияние охлаждения на механические свойства стали Q235B:

ромбические точки — стандартное охлаждение; квадратные точки — интенсивное охлаждение

Проведено исследование микроструктуры и твердости образцов стали классов прочности K48 и K56, подвергнутых термомеханической обработке на дилатометре по режимам стандартного и интенсивного охлаждения (рис. 7).

Установлено, что при увеличении скорости охлаждения от 40 до 95 °C/c твердость повышается. Разница в пересчете на временное сопротивление разрыву составляет 50 МПа. Микроструктура при этом изменяется с классической феррито-перлитной с зерном феррита преимущественно полигональной формы на

2. Влияние Power and Laminar Cooling на свойства и структуру стали

Параметр	Power Cooling (30 °C/c)	Laminar Cooling (10 °C/c)
Содержание марганца, %	0,5	1,5
Размер зерна, мкм	5,95	5,65
Твердость, HV 10	121,0	128,1

zp318.indd 125 20.03.2018 14:18:20

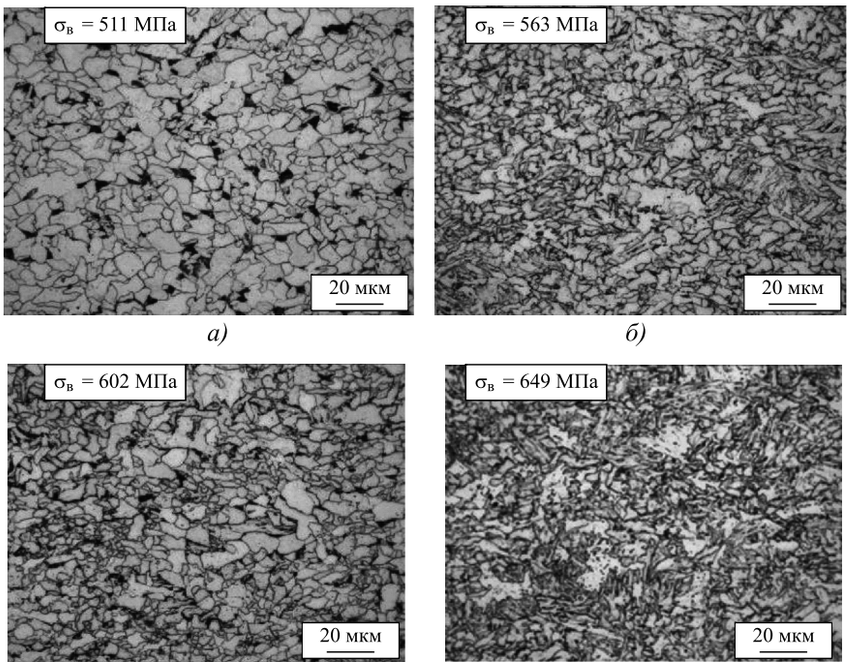


Рис. 7. Микроструктуры образцов после различных режимов охлаждения:
а, *б* — сталь класса прочности К48, толщина 6 мм; *в*, *г* — сталь класса прочности К56, толщина 6 мм; *а*, *в* — $v_{охл}$ = 40 °С/с; *б*, *г* — $v_{охл}$ = 95 °С/с

структуру промежуточного типа, представленную бейнитом с присутствием квазиполигонального феррита. Размер зерен феррита отличается более чем на 3 балла.

Обобщая исследовательские данные, можно сделать вывод, что ожидаемый прирост предела текучести и временного сопротивления составит ≈30...50 МПа. Повышение уровня механических свойств за счет режимов охлаждения позволяет снизить количество легирующих элементов и, соответственно, себестоимость рулонного проката. Модернизацию систем охлаждения с установкой интенсивных секций можно рекомендовать на непрерывных широкополосных станах российских металлургических предприятий.

Заключение. В настоящее время наиболее распространенными являются установки ламинарного охлаждения полосы, в частности конструкции U-tube и Water Wall, однако они имеют ограничения по повышению скорости охлаждения.

Современные системы интенсивного охлаждения полосы, или Ultra-Fast Cooling, позволяют в несколько раз увеличить скорость охлаждения. Наиболее распространенные из этих систем — Compact Cooling от SMS Group и Power Cooling от Primetals.

Металлографические исследования показали, что повышение скорости охлаждения после предварительной деформации оказывает положительное влияние на упрочнение металла. Это связано с измельчением зерна феррита и превращением части аустенита в бейнит и продукты промежуточного превращения. При использовании интенсивного охлаждения размер зерен может отличаться более чем на 3 балла, временное сопротивление стали может быть увеличено на 30...50 МПа и, соответственно, значительно снижены количество легирующих элементов и себестоимость стали.

Использование интенсивного охлаждения в конце отводящего рольганга, которое позволяет получать качественные двухфазные стали, является менее распространенным. Как правило, в этом случае требуется также модернизация моталки для обеспечения низких температур окончания охлаждения (менее 300 °С).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Эфрон Л.И.** Металловедение в "большой" металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012. 696 с.

2. **Настич С.Ю.** Разработка технологии термомеханической обработки полосового и листового проката из низколегированной стали на основе управления формированием ферритно-бейнитной структуры: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Металлургиздат, 2013. 46 с.

3. **Коновалов Ю.В.** Справочник прокатчика. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.

4. **Herman J.C., Lacroix J., Riche P.** Ultra-fast cooling in the hot-strip mill (Phase I) / European Commission. Technical steel research. 2002. 69 p.

zp318.indd 126 20.03.2018 14:18:20

5. **Ultra-fast** cooling in the hot-strip mill (Phase II) / P. Riche, J.C. Herman, M. Op de Beeck, H. Rackel / European Commission. Technical steel research. 2002. 58 p.

6. **Пат. 2 333 057 РФ, С2**. Устройство для подачи воды от стационарного трубопровода к коллекторам-бакам системы ламинарного охлаждения полосы. / В.Д. Плахтин, С.И. Фришман, В.С. Тихомиров. Опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25.

7. **Пат. 2 244 022 РФ, С1.** Устройство для охлаждения проката / В.А. Третьяков, С.А. Ракитин, З.П. Каретный, Б.А. Поляков, В.В. Барышев, Е.А. Варшавский, Н.В. Фомин, И.П. Мазур, А.В. Басуров. Опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1.

8. **www.sms-siemag.com** (дата обращения: 15.05.2017).

9. **Power** Cooling / E. Opitz, A. Seilinger, L. Pichler, O. Silbermann, A. Rimnac // Materials Science Forum. 2016. Vol. 854. P. 225—230.

10. **High** performance solutions for rolling of advanced high-strength steel grades in hot-strip mills. / J. Maierl, J. Thoresson, E. Opitz, K. Weinzierl. METEC. Düsseldorf, 15—19 June 2015.

11. **www.primetals.com/press media/news** (дата обращения: 01.09.2017).

12. **Seilinger A., Trickl T., Weinzier K.** Installation of a power cooling unit at hot strip mill No. 2 of ThyssenKrupp Steel Europe AG, Duisburg-Beeckerwerth, Germany. Millenium Steel. 2012.

13. **Cai X., Liu C., Liu Zh.** Process design and prediction of mechanical properties of dual phase steels with prepositional ultra fast cooling // Materials and Design. 2014. 53. P. 998—1004.

14. **Research** on Ultra-fast Cooling Heat Transfer Coefficient Affecting Law for Hot Strip Mill / L. Jiang, G. Yuan, Z. Li, D. Wu, G. Wang // Trans Tech Publications, Switzerland. Materials Science Forum. 2014. Vol. 788. P. 346—350.

15. **Ultra fast cooling** on Baotou CSP line and development of 590 MPa grade C—Mn low-cost hot-rolled dual phase steel / G. Wang, X. Liu, L. Sun, Z. Liu, D. Liu // Iron and Steel. 2008. 43 (3). P. 49—52.

16. **Mathematic** modeling on flexible cooling system in hot strip mill. / L. Peng, X. Liu, X. Zhao, D. Wu // J. Cent. South Univ. 2014. 21. P. 43—49.

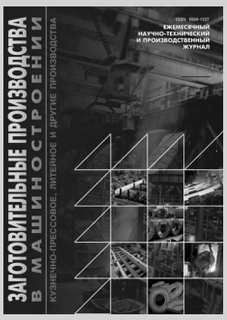
17. **Fujibayashi A., Omata K.** JFE Steel's Advanced Manufacturing Technologies for High Performance Steel Plates // JFE Technical Report. 2005. No. 5. P. 10—15.

18. **Advanced** run-out table cooling technology based on ultra fast cooling and laminar cooling in hot strip mill / E. Liu, L. Peng, G. Yuan, Z. Wang, D. Zhang, G. Wang // J. Cent. South Univ. 2012. 19. P. 1341—1345.

19. **Control** and application of cooling path after rolling for hot strip based on ultra fast cooling / G. Yuan, Z. Li., Z. Wang, G. Wang // Cent. South Univ. 2013. 20. P. 1805—1811.

20. **Pichler L., Samanta S., Weinzierl K.** The cooling competencies for the hot rolled flat products customized for the strip and plate producers // Proceeding of ROLLING 2016 Conference. 6—9 June 2016, Congress Graz / Austria. P. 337—347.

Александр Вадимович Мунтин, канд. техн. наук;
Евгений Александрович Солдатов,
soldatov_ea@vsw.ru



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,
тел.: (495) 785-6069,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

zp318.indd 127 20.03.2018 14:18:20

УДК 621.7, 669-1

А.Н. Петров, А.П. Соляков, М.А. Петров
(Московский политехнический университет)

Исследование структурных изменений заготовок из жаропрочных сплавов после нагрева в расплаве соли хлористого бария

Исследована структура образцов заготовок из жаропрочных сплавов после нагрева в соли хлористого бария. Установлено, что окисление по границам зерен (межкристаллитная коррозия) составляет 30...64 мкм. Для получения годных заготовок лопаток необходимо увеличивать припуск на обработку и трудоемкость изготовления в результате дополнительных операций очистки поверхности заготовок после выдавливания. Альтернативой нагрева заготовок в соли бария может быть нагрев в электропечи с защитными покрытиями.

Ключевые слова: хлористый барий; жаропрочный сплав; макроструктура; микроструктура; спектроскопия; межкристаллитная коррозия.

Microstructural changes of blanks made of Ni-based alloys after their heating in electrode salt bath filled with barium chloride are studied. It is founded, that there is intergranular corrosion of 30....64 μm in size in the surface layer of the blank. One of the way to produce quality blade forgings is to increase the forge allowance. Moreover, it is more labor-intensiveness process due to added operations such as tumbling, sand blasting and others. On the other hand, special coatings for Ni-based alloys and heating in electric induction furnace instead of electric salt bath furnace could be used to minimize the oxidation process.

Keywords: barium chloride; high-temperature alloy; macrostructure; microstructure; spectrometry; intercrystalline corrosion.

Выбор и применение эффективных смазочных материалов и теплозащитных покрытий для процессов горячей штамповки является актуальной задачей, решение которой позволяет значительно повысить эффективность технологических процессов [1].

Известны технологии проведения термической обработки штамповочного инструмента в специальных электродных соляных ваннах, в которых в качестве среды рабочего пространства применяют смесь солей $NaCl—BaCl_2$ (750...1100 °С) или $BaCl_2$ (до 1300 °С). Данный тип нагрева также используют при нагреве небольших заготовок в кузнечном производстве перед штамповочными операциями и, в частности, для нагрева заготовок из жаропрочных сталей и никелевых сплавов [2].

К преимуществам нагрева металлов в солях можно отнести более интенсивный нагрев материала по всему объему, сокращение времени нагрева, безокислительную атмосферу и равномерное температурное поле по объему печи. По данным [3, 4], хлористый барий играет роль не только теплозащитного покрытия при нагреве, но и смазочного материала при последующем деформировании.

В процессе нагрева в расплаве соли хлористого бария поверхностные слои разных материалов подвергаются окислению с разной интенсивностью. Поэтому после нагрева проводят дополнительные операции очистки поверхности заготовок. Применение автоматизации (роботов) для процесса нагрева заготовок и последующего переноса их в зону пресса представляет собой непростую задачу, что связано прежде всего с надежностью работы электронных систем управления (см. кн.: Применение стеклянных защитных покрытий

zp318.indd 128 20.03.2018 14:18:20

при штамповке лопаток из жаропрочных сплавов / под общ. ред. Н.И. Конеева, И.Г. Скугарева, М.Я. Кулешова. М.: Машиностроение, 1966. 124 с.).

Существенными недостатками применения хлористого бария в технологических процессах являются плохая экологическая среда в зоне рабочего пространства, отсутствие возможности контроля температуры нагрева заготовок.

Излишки соли, не удаленные с поверхности заготовки после нагрева перед штамповкой, попадают в штамп, измельчаются при последующем деформировании и при достижении определенных значений удельных давлений имеют высокие адгезивные свойства с материалом штампа, что приводит к незаполнению ручья штампа или вминаются в поковку [5]. Известно также, что приповерхностные слои нагреваемых металлов корродируют при контакте с расплавами солей [6]. В обоих случаях получают дефектные поковки. Эксплуатация ванн предполагает большие затраты на замену электродов из жаропрочных материалов, замену состава ванны, а также затраты на электроэнергию мощной вентиляции.

Исследовали макро- и микроструктуру заготовок из жаропрочных сплавов на никелевой основе после нагрева в расплаве соли хлористого бария $BaCl_2$ в электродной соляной ванне. Натурные образцы заготовок поковок лопаток компрессора использовали для изучения влияния нагрева в соли хлористого бария на изменение структуры после деформирования.

Цилиндрические образцы из никелевых сплавов нагревали до температуры 1120 °С в течение 180...300 с. Далее извлекали из печи, очищали от остатков расплава и подготовляли шлифы.

1. Результаты нагрева заготовок в расплаве $BaCl_2$

Номер образца	Время нагрева, с	Глубина слоя, окисленного по границам зерен, мкм, не более	
		Торцевая поверхность	Цилиндрическая поверхность
1	180	40	33
2		34	30
3	300	58	60
4		60	64

а) *б)*

Рис. 2. Исходная заготовка (*а*) и заготовка после выдавливания (*б*)

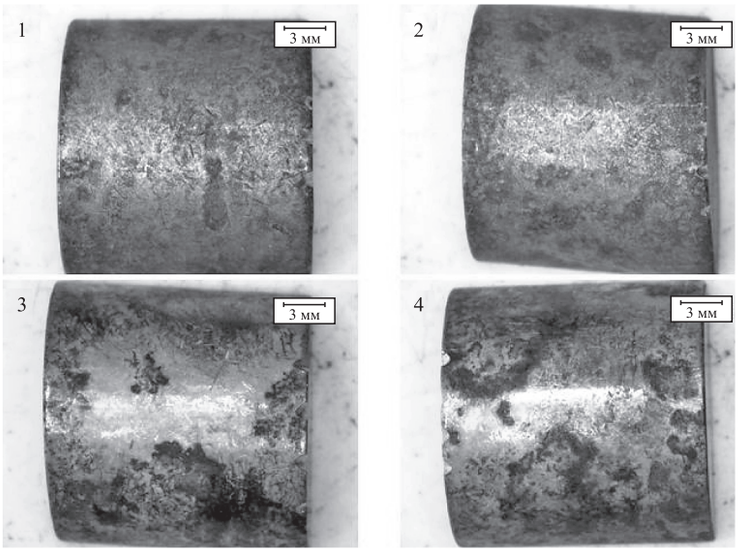


Рис. 1. Цилиндрическая поверхность образцов № 1—4 после нагрева в расплаве соли $BaCl_2$

Микроструктурный анализ приповерхностного слоя проводили на световом и электронном микроскопах для определения мест появления микротрещин и характеристики зерна микроструктуры, а рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) — для определения химического состава элементов микроструктуры. Аналогичные исследования осуществляли и для поковок лопаток, полученных после их прямого выдавливания.

В табл. 1 приведены результаты нагрева заготовок в расплаве $BaCl_2$, а на рис. 1 — образцы после нагрева в расплаве $BaCl_2$. На рис. 2 показаны исходная заготовка и заготовка лопатки после выдавливания из сплава ЭП718ИД.

Поверхность исходной заготовки серо-зеленого цвета, имеет участки со стекловидным слоем. Поверхность выдав-

zp318.indd 129 20.03.2018 14:18:20

ленной заготовки темно-серого цвета, матовая с продольными рисками на пере. Полученные результаты исследования согласуются с литературными [3] и нормативными источниками.

При изучении приповерхностного слоя исходной заготовки (рис. 3) и поковок лопаток (рис. 4) обнаружен окисленный слой глубиной 20...30 мкм с проникновением $BaCl_2$ по границам зерен и с образованием межкристаллитной коррозии (МКК). На поверхностях выдавленной заготовки (см. рис. 4) в зоне замка наблюдается аналогичный окисленный

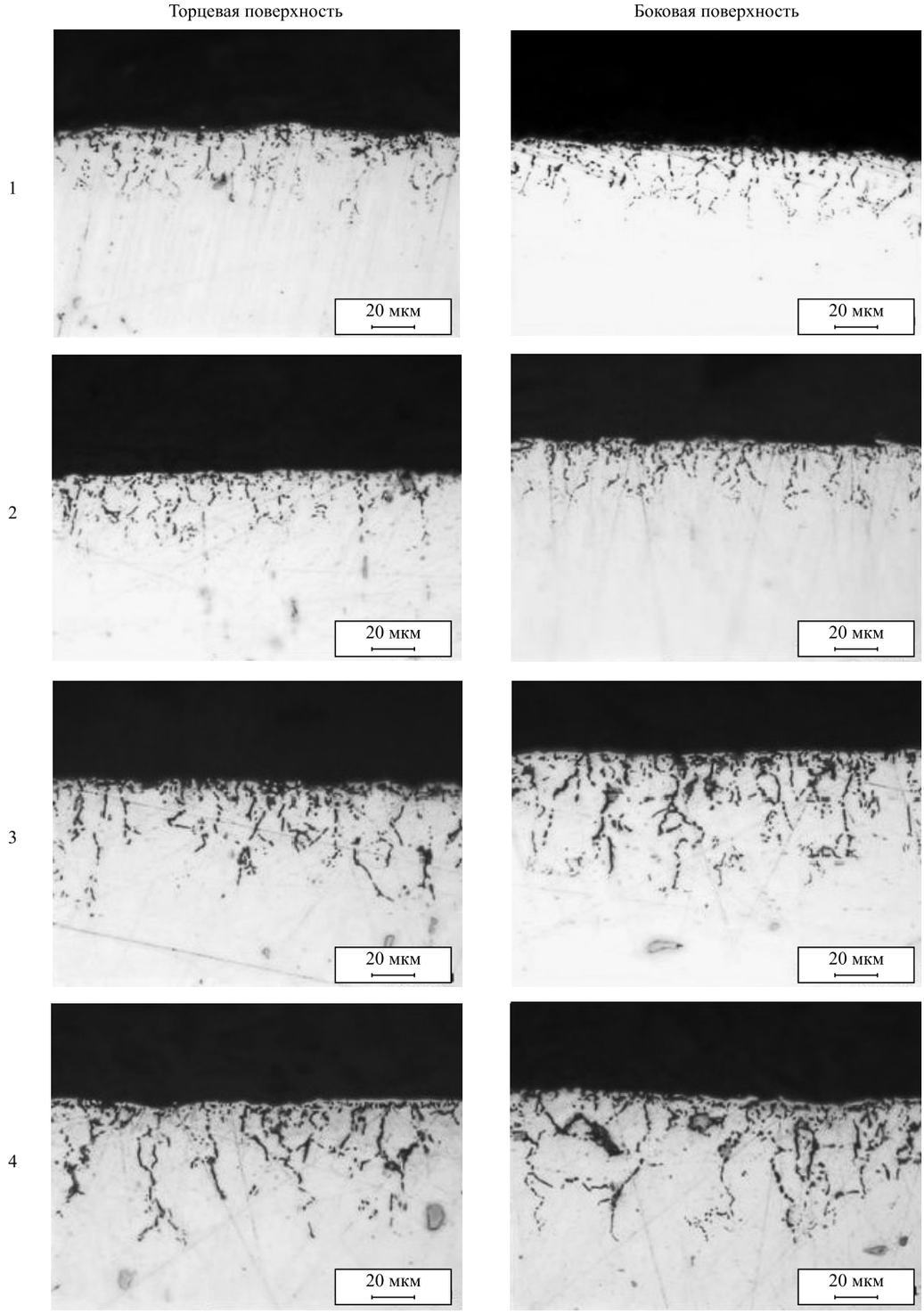
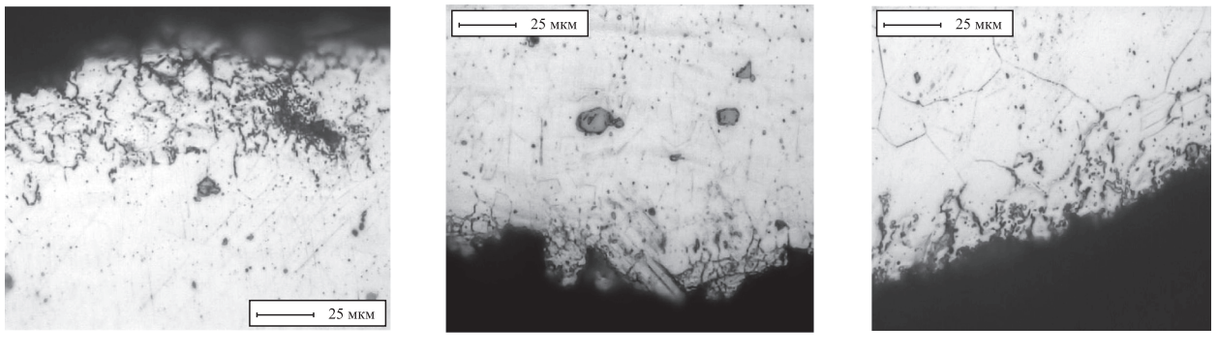


Рис. 3. Микроструктуры приповерхностного слоя образцов № 1—4 после нагрева в расплаве $BaCl_2$

zp318.indd 130 20.03.2018 14:18:20



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Микроструктуры образцов заготовок лопаток:
а — исходная заготовка; *б* — перо лопатки; *в* — замок лопатки

2. Содержание химических элементов в приповерхностном слое лопаток

Область (см. рис. 5)	O	Si	Cl	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo	Ba	W
I — основа	—	0,10	—	1,93	15,12	29,60	44,26	4,38	—	2,94
II — с поверхности	—	0,26	0,10	0,27	1,13	11,15	61,80	6,73	1,08	6,50
III — включение	13,22	1,69	0,29	1,16	1,75	8,89	33,76	3,41	3,77	3,35
ЭП718 по ТУ 14-1-3905—85	7,22	⩽0,3	—	1,9...2,4	14...16	Остальное	43,0...47,0	4,0...5,2	—	2,5...3,5

слой глубиной до 40 мкм, а на пере происходит окисление по границам зерен до 10 мкм с образованием складки глубиной до 30 мкм. Микроструктура на пере имеет вытянутую, деформированную текстуру вдоль оси пера.

Результаты РСМА по определению химического состава материала (табл. 2) подтверждают образование окисленной поверхности заготовок с присутствием $BaCl_2$ (рис. 5). Аналогичный результат получен на заготовках лопаток из сплава ЭП866 после нагрева в расплаве $BaCl_2$ и последующего выдавливания (рис. 6, *а*).

Исследования под бинокулярным (рис. 6, *б*) и электронным (рис. 6, *в*) микроскопами показали, что поверхность лопаток окислена до темно-серого цвета, также на поверхности наблюдается растрескивание по границам зерен (результат МКК).

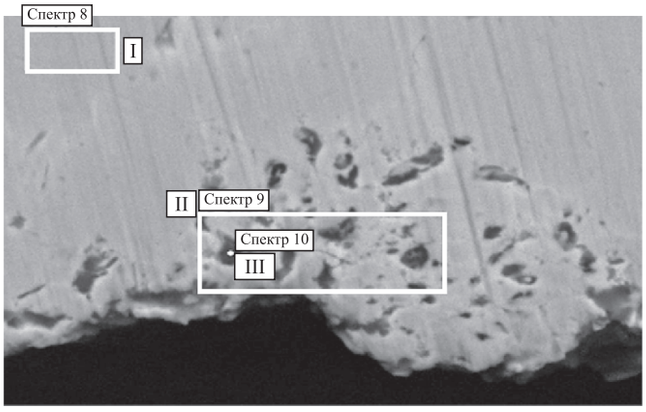
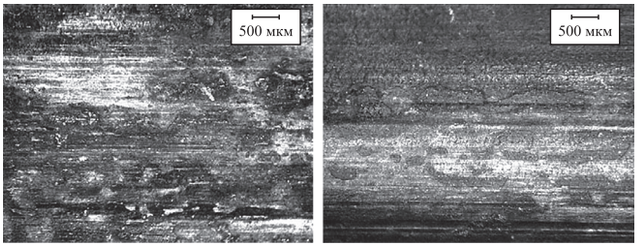


Рис. 5. Микроструктура приповерхностного слоя заготовки

а)



б) *в)*

Рис. 6. Результаты исследования макроструктуры лопаток на стереомикроскопе:
а — заготовки лопаток после выдавливания (№ 1 — слева, № 2 — справа); *б* — лопатка № 1, ×40; *в* — лопатка № 2, ×40

zp318.indd 131 20.03.2018 14:18:20

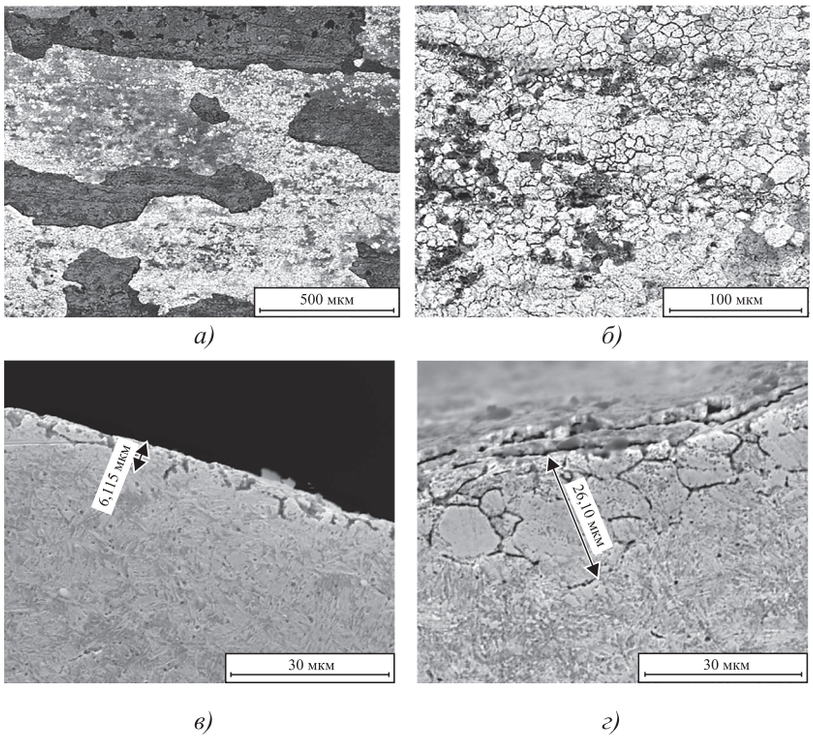


Рис. 7. Микроструктуры поверхности исследуемых лопаток:

а — окисленный слой, ×100; *б* — межкристаллитная коррозия, ×500; *в* — лопатка № 1, ×2000; *г* — лопатка № 2, ×2000

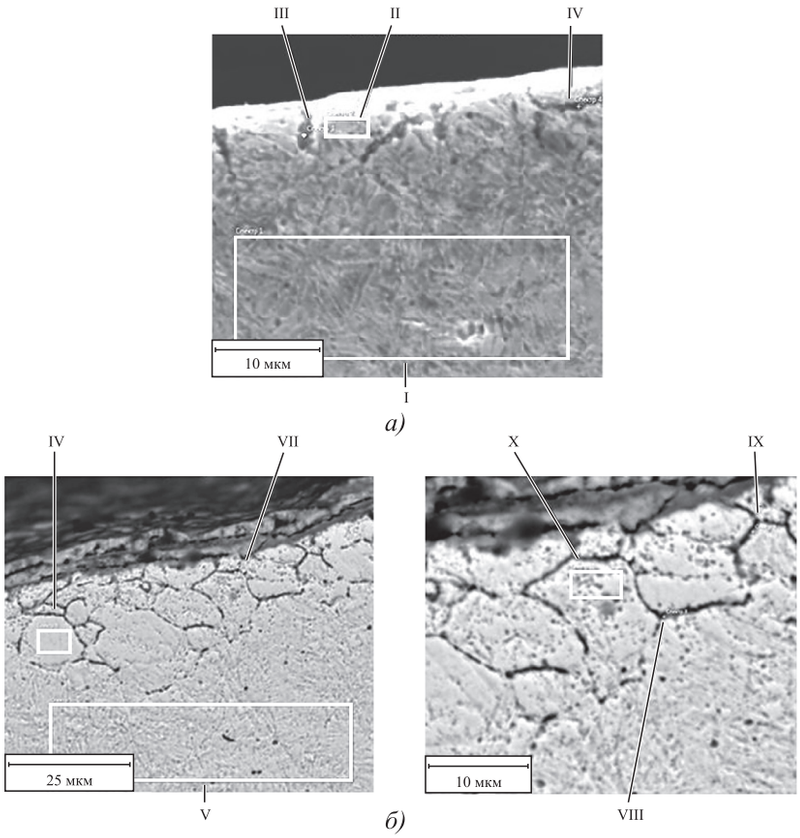


Рис. 8. Микроструктуры приповерхностного слоя:

а — лопатка № 1; *б* — лопатка № 2

zp318.indd 132 20.03.2018 14:18:20

3. Содержание химических элементов в приповерхностном слое

Область (см. рис. 8)	Si	Cl	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Лопатка № 1										
I — основа	0,54	—	0,25	15,94	0,39	72,80	5,28	1,94	1,56	1,09
II — с поверхности	0,61	—	0,25	15,51	0,44	72,97	5,07	1,97	1,53	1,47
III — включение	1,08	0,17	0,21	13,17	0,37	57,98	6,96	3,12	2,33	1,18
IV — включение	0,69	0,21	0,22	15,43	0,38	65,25	5,58	2,29	1,80	0,93
Лопатка № 2										
V — основа	0,51	—	0,24	15,97	0,37	72,88	5,20	1,91	1,47	1,19
VI — с поверхности	0,48	—	0,23	15,88	0,46	73,36	5,29	2,00	1,34	0,97
VII — включение	0,48	0,87	0,24	17,54	0,43	70,47	5,13	1,87	2,01	0,95
VIII — основа	0,48	1,18	0,24	16,70	0,48	71,56	5,33	1,91	1,44	0,69
IX — с поверхности	1,04	0,47	0,22	16,14	0,44	71,69	5,08	1,93	1,78	0,89
X — включение	0,81	—	0,20	16,22	0,39	72,19	5,31	1,88	1,69	1,10

4. Результаты исследований при нагреве в расплаве $BaCl_2$ никелевых сплавов

Сплав	$T_{нагр}$, °C	Глубина МКК, мкм
ЭП718ИД, лабораторный образец	1120	30...64
ЭП718ИД: исходная заготовка заготовка после выдавливания	1120	 30 10...40
ЭП866, заготовки № 1 и № 2 после выдавливания	1150	6...26

Исследование микрошлифов, подготовленных в поперечном направлении к оси пера лопатки, на электронном микроскопе JEOL JIB4543 более отчетливо показало наличие на поверхности обеих лопаток растрескивания по границам зерен (результат МКК), средний размер которых составил до 6,115 мкм, а максимальный размер на отдельных участках до 26,10 мкм (рис. 7).

РСМА для двух лопаток установлено (табл. 3, рис. 8), что в приповерхностных слоях обеих лопаток наблюдается проникновение солей хлора по границам зерен. В табл. 4 приведены результаты исследований для никелевых сплавов ЭП718ИД и ЭП866.

Выводы

1. В процессе нагрева заготовок в расплаве соли хлористого бария $BaCl_2$ наблюдается образование межкристаллитной коррозии глубиной до 64 мкм.

2. При межкристаллитной коррозии необходимо увеличение припуска заготовки, что приводит к повышению общей трудоемкости изготовления заготовок под штамповку лопатки.

3. Альтернативой нагреву заготовок в расплаве хлористого бария может быть нагрев заготовок в электрической печи с использованием теплозащитных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Использование** теплозащитных покрытий для нагрева заготовок компрессорных лопаток из жаропрочных сталей и последующего выдавливания / А.Н. Петров, А.П. Соляков, М.А. Петров, С.В. Мизера // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2016. № 3. С. 29—33.

2. **Петров А.Н., Соляков А.П.** Теплозащитные покрытия для прецизионной штамповки жаростойких сталей // Известия "МГТУ "МАМИ"". 2013. № 1 (15). Т. 2. С. 85—88.

3. **Петров А.Н.** Исследование коллоидно-графитовых теплозащитных покрытий для никелевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 5. С. 35—38.

4. **Петров А.Н.** Коллоидно-графитовые смазочные материалы в процессах горячего деформирования сталей и сплавов. М.: МГТУ "МАМИ", 2012. 212 с.

5. **Влияние** процессов точной штамповки и холодного вальцевания пера рабочих лопаток компрессора из жаропрочных сплавов на качество их изготовления / Ю.С. Кресанов, А.В. Богуслаев, А.Я. Качан, Л.И. Гасик // Вестник двигателестроения. 2010. № 1. С. 60—71.

6. **Rapp R.A., Goto K.S.** The hot corrosion of metals by molten salts // Proceeding of the second international symposium on molten salts / под ред. Д. Браунштайн, Д.Р. Селман. Пеннингтон, США: The electrochemical society Inc., 1981. Vol. 81-10. P. 159—172.

Александр Николаевич Петров, д-р техн. наук,
alexander_petr@mail.ru;
Александр Петрович Соляков;
Михаил Александрович Петров, канд. техн. наук

zp318.indd 133 20.03.2018 14:18:21

УДК 621.762

С.А. Котов, А.Н. Бурлова, Е.Д. Зверева
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Получение композиционного материала с редкоземельными металлами методом прокатки

Изучены физико-химические свойства исходных порошков на основе меди с добавками редкоземельных металлов. Показана возможность получения из них композиционного материала методом прокатки. Микроструктура полученного материала имеет равномерное распределение редкоземельных металлов по сечению проката. Получены заготовки композиционного материала, содержащего редкоземельные металлы или их оксиды, имеющие удовлетворительные механические свойства и способные поглощать нейтронное излучение.

Ключевые слова: порошковая металлургия; пластическая деформация; микроструктура; механические свойства.

The physical and chemical properties of the powders based on copper with additions of rare-earth metals are studied. The possibility of manufacturing of composite material from these powders using the rolling method is shown. The microstructure of the composite material has uniform distribution of rare-earth metals over the rolled section. Blanks of the composite material containing rare-earth metals or their oxides having satisfactory mechanical properties and capable of absorbing neutron radiation are produced.

Keywords: powder metallurgy; plastic deformation; microstructure; mechanical properties.

В настоящее время развитие большинства отраслей промышленности требует не только использования традиционных конструкционных материалов, но и создания принципиально новых функциональных материалов, обладающих комплексом уникальных или аномально высоких свойств. Эти материалы с особыми физическими, химическими и механическими свойствами применяют в различных областях современной техники, в том числе в машиностроении, атомной энергетике, автомобилестроении и др. [1—4]. Создание функциональных материалов возможно только на основе использования современных технологических процессов и нестандартных подходов к их реализации.

Одной из проблем современного энергетического машиностроения является создание материалов, способных противостоять радиационным повреждениям [5, 6] и защищающих окружающее пространство от вредного воздействия радиоактивных веществ [7—9].

Так, некоторые изотопы *редкоземельных металлов* (РЗМ) (европий, бор, гадолиний) обладают высокими коэффициентами захвата тепловых нейтронов, что обеспечивает возможность их использования для конструкционных материалов, для защиты от воздействия нейтронного излучения. Особый интерес представляет европий. Изотопы 151 и 153, из которых он состоит в естественном виде, при захвате нейтронов образуют новые изотопы европия также с большим сечением поглощения тепловых нейтронов. Благодаря такому эффекту "выгорание" европия будет замедленным. Эффективными поглотителями нейтронов являются бор, кадмий и РЗМ.

Наиболее перспективным способом получения металлических материалов с РЗМ является порошковая металлургия с использованием различных современных технологических процессов [10—13].

Цель работы — экспериментальная оценка возможности получения композиционного материала из механически легированных порошков, содержащих РЗМ, методом прокатки.

Экспериментальные исследования. Для изготовления композиционного материала в качестве основы использовали порошок меди (основа) со средним размером частиц менее 100 мкм. Легирующая добавка — лигатура АКЦ (Al—Ni—Ce—La). Размер предварительно измельченного порошка лигатуры АКЦ составлял менее 400 мкм. В качестве агента, контролирующего процесс механического легирования (механолегирования), применяли цис-октадеценовую кислоту.

zp318.indd 134 20.03.2018 14:18:21

Механолегирование выполняли в шаровых мельницах с горизонтальной осью вращения, в так называемых гравитационно-зависимых шаровых мельницах, работающих в высокоэнергетическом режиме. Время механолегирования порошковых смесей составляло от 100 до 400 ч. Суммарное количество РЗМ, вводимых в шихту в виде лигатуры АКЦ: 10, 15 или 20 % мас.

В табл. 1 приведены физико-химические свойства порошков, полученных при различном времени механолегирования. Из данных табл. 1 видно, что увеличение продолжительности механолегирования от 100 до 400 ч не приводит к существенному изменению насыпной плотности порошков и плотности их утряски. Увеличение содержания РЗМ от 10 до 20 % мас. приводит к уменьшению насыпной плотности и плотности утряски порошков на 20 %.

Гранулометрический состав исследуемых порошков определяли на специальном приборе "Ротап" с комплектом сит с различными размерами отверстий. На рис. 1 (см. обложку) приведены гистограммы распределения для порошков разного состава, с разным временем механолегирования (Q — относительное количество частиц порошка определенной фракции; $d_{ср}$ — средний диаметр частиц порошка).

Полученные механолегированием порошки подвергали последующей прокатке в медном контейнере. Известен способ получения листовых заготовок из алюминиевого порошка, основанный на использовании горячей прокатки [14]. По этому способу алюминиевый порошок в виде гранул размером 50...200 мкм засыпают в оболочку в виде корытообразного лотка с крышкой, изготовленной из листовой стали толщиной 0,5...2,0 мм с равными или различными толщинами стенок, контактирующими при обжатии с валками. Затем уплотняют порошок, нагревают замкнутую оболочку с порошком до температуры не ниже 500 °С, далее обжимают в валках прокатного стана, охлаждают, разрезают оболочку и извлекают готовую листовую алюминиевую заготовку.

В данной работе оболочку для контейнера изготовляли из листового материала толщиной 2,5 мм. Материал оболочки — медь М1. Общий маршрут горячей прокатки: 16,0—8,5—5,0—3,0 мм. Затем проводили калибровочные проходы на стане без нагрева заготовки — холодная прокатка по маршруту 3,0—2,0—1,0—0,5 мм. Наличие прочной оболочки гарантировало целостность и прочность полученного листового композиционного материала для всех образцов.

При обжатии не менее 50 % в первом проходе горячей прокатки происходят большие сдвиговые деформации частиц медного порошка под давлением. Осуществляется уплотнение частиц меди между собой и медного порошкового наполнителя с листовой оболочкой из медного сплава. Применение обжатия менее 50 %, как показывают экспериментальные данные, не позволяет достичь требуемого результата. Обжатие более 50 % нецелесообразно, так как связано с дополнительными технологическими проблемами. Обжатие во втором проходе составило 30...40 %. Использование меньшего значения обжатия во втором проходе оказалось безрезультатным, а большего — технологически неоправданным.

Для оценки механических свойств полученных заготовок измеряли микротвердость четырех образцов композиционного материала на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор

1. Физико-химические свойства порошков Cu + РЗМ, полученные при различном времени механолегирования

Номер образца	Состав порошка и время механолегирования	$\rho_{нас}$	$\rho_{утр}$	$\rho_{комп}$	$\Theta_{нас}$	$\Theta_{утр}$	D, мм	T, г/с	β_1, °	β_2, °
		г/см^3			отн. ед.					
1	Cu + 10 % РЗМ, 200 ч	2,89	3,30	7,89	0,37	0,42	5,00	12,05	30,67	37,36
2	Cu + 15 % РЗМ, 100 ч	2,86	3,28	7,47	0,38	0,44	5,00	7,99	30,33	44,60
3	Cu + 15 % РЗМ, 200 ч	2,56	2,97	7,47	0,34	0,40	7,50	31,06	33,67	47,24
4	Cu + 15 % РЗМ, 400 ч	2,64	3,04	7,47	0,35	0,41	5,00	9,28	31,67	42,94
5	Cu + 20 % РЗМ, 200ч	2,31	2,75	7,09	0,33	0,39	7,50	21,16	36,33	46,25

Обозначения: $\rho_{нас}$ — насыпная плотность; $\rho_{утр}$ — плотность утряски; $\rho_{комп}$ — компактная плотность, $\Theta_{нас}$ — относительная насыпная плотность; $\Theta_{утр}$ — относительная плотность утряски; D — диаметр отверстия воронки; T — текучесть; β_1 — угол внешнего трения; β_2 — угол межчастичного трения.

zp318.indd 135 20.03.2018 14:18:21

2. Микротвердость образцов композиционных материалов

Номер образца (см. табл. 1)	Длина вертикальной/горизонтальной диагонали отпечатка, мкм		Микротвердость, HV 0,05
	Оболочка	Композиционный материал	
5	103,4/101,6	286/57,6	28,5
1	106,8/107,8	63,2/60,6	24,1
2	104,6/102,2	68,4/68,8	19,5
4	101,2/97,8	67,4/67,0	20,7

0,490 Н (50 гс). Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Установлено, что изменение времени легирования от 100 до 400 ч не приводит к существенному изменению микротвердости. При этом микротвердость всех образцов, содержащих РЗМ, равна 19,5...28,5 HV, что выше микротвердости чистой меди (оболочки) в 2—3 раза (табл. 2).

Для анализа механических характеристик полученных композиционных материалов Cu + РЗМ проведены испытания на статическое растяжение. Для снятия остаточных напряжений образцы подвергали отжигу при температуре 550 °С в течение 30 мин. Результаты испытаний представлены на рис. 2 (см. обложку), где τ — время механолегирования; s — толщина стенки контейнера.

Механические свойства образцов № 3, 4 и 5, такие как $\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, δ, существенно ниже, чем для образца № 1, вероятно, из-за большей толщины стенки контейнера, и образца № 6 — из-за отсутствия добавок РЗМ.

Таким образом, изменения состава порошков и времени механолегирования (образцы № 3, 4 и 5) не оказывают значительного влияния на предел прочности и пластичность.

В процессе отжига всех образцов происходит уменьшение остаточных напряжений. При этом прочностные характеристики сплавов снижаются в ~2 раза при одновременном возрастании пластичности.

Заключение. Результаты исследования свидетельствуют о возможности получения композиционного материала на основе меди с добавками редкоземельных металлов методом механолегирования с последующей прокаткой. Экспериментально полученный материал после отжига имеет удовлетворительные механические свойства: предел прочности $\sigma_в$ = 50 МПа, предел текучести $\sigma_{0,2}$ = 45 МПа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Pushin V.G.** Alloys with a thermomechanical memory: structure, properties, and application // The Physics of Metals and Metallography. 2000. Vol. 90. P. 568—595.
2. **Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А.** Введение в химию функциональных материалов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2006. 125 с.
3. **Сплавы** высокого демпфирования на медной основе / В.В. Матвеев, Г.Я. Ярославский, Б.С. Чайковский, С.Ю. Кондратьев. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
4. **Фукс М.Д., Зеленин Ю.В., Кондратьев С.Ю.** Исследование качества металла толстостенных труб из коррозионно-стойких сталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 36—38.
5. **Ма Б.М.** Материалы ядерных энергетических установок: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 408 с.
6. **Рыжков Ю.А., Дергачев В.В.** Порядок испытаний и проверок экспериментальных ТВС на Балаковской АЭС // Труды междунар. науч. конф. "Становление и развитие научных исследований в высшей школе". Саратов: Изд-во СГТУ, 2014. С. 107—111.
7. **Кириллин В.А.** Энергетика. Главные проблемы. М.: Знание, 1990. 128 с.
8. **Куликов А.Н.** Стратегические материалы будущих поколений // Труды всероссийской науч. конф. "Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов". Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010. С. 10—11.
9. **Obaturov G.M., Duba V.V., Potetnya V.I. et al.** Yieia of production as a function of heavy charged particle and neutron energy // Studia biophys. 1982. Vol. 89. № 2. P. 133—139.
10. **Соколов Ю.А., Павлушин Н.В., Кондратьев С.Ю.** Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 72—76.
11. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30—35.
12. **Особенности** моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом / А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 91—96.
13. **Теория** и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа / В.Н. Кокорин, А.И. Рудской, В.И. Филимонов, Е.М. Булыжев, С.Ю. Кондратьев. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
14. **Пат. 2206430 РФ, МПК7 B22P 3/18.** Способ получения листовых заготовок из алюминиевого порошка / М.М. Ванинский и др. Опубл. 20.06.2003.

Сергей Анатольевич Котов, канд. техн. наук,
serkotov51@mail.ru;
Анна Николаевна Бурлова;
Екатерина Дмитриевна Зверева

zp318.indd 136 20.03.2018 14:18:21

УДК 621.313, 621.979.1

Е.Н. Складчиков
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
А.В. Лазуткин
(АО "Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина", г. Химки)

Расчет долговечности двигателей главного и вспомогательных приводов кривошипных прессов

Приведен расчет долговечности двигателей главного и вспомогательных приводов кривошипных прессов на основе математического моделирования работы пресса, позволяющего определить эквивалентный ток двигателя и, сопоставляя его с номинальным током, рассчитать долговечность двигателя. В связи с этим возможно проектировать электропривод прессов с полным использованием ресурса двигателя, что улучшает экономические показатели производственных структур.

Ключевые слова: кривошипный пресс; электропривод; эквивалентный ток; долговечность; математическое моделирование.

The calculation of durability of main and auxiliary drives motors of crank presses is presented on the basis of mathematical modelling of press work, which allows to determine the equivalent current of the motor and comparing it with the nominal current to calculate of motor durability. In this connection there is opportunity to project the electric drive of presses with full use of resource of the motor that improves economic parameters of industrial structures.

Keywords: crank press; electric drive; equivalent current; durability; mathematical modelling.

В 95 % случаев причиной отказа электродвигателей является старение изоляции обмоток и, как следствие, ее осыпание с проводников и межвитковых замыканий [1]. Повышенная температура обмоток ускоряет процесс старения. Поэтому долговечность двигателей, в том числе и двигателей главного привода кривошипных прессов, зависит в основном от их температурного режима, который определяется тепловым эффектом тока и связан с мощностью, отдаваемой электродвигателем.

Прямой расчет долговечности электродвигателей предполагает вычисление температуры обмоток двигателя. Ее определение возможно на основе разработки электротепловой модели электродвигателя, однако в настоящее время разработка такой модели, ориентированной на практическое использование, не завершена [2]. Поэтому все применяемые методы расчета привода кривошипных прессов являются косвенными и сводятся к определению условий, при которых двигатель имеет нормативную долговечность.

Наиболее точным методом расчета электропривода оборудования, включая и кривошипные прессы, является метод эквивалентного тока [3]. Возможность его реализации появилась с использованием в практике расчетов прессов математического моделирования [4, 5].

Под эквивалентным током понимают такой ток двигателя при его постоянной нагрузке, который по тепловому эффекту эквивалентен току двигателя при его фактической нагрузке, изменяющейся в течение цикла работы оборудования. Если эквивалентный ток в кон-

zp318.indd 137 20.03.2018 14:18:21

Подбор двигателя и маховика для пресса К460

№ п/п	Типоразмер двигателя (мощность)	Момент инерции маховика, кг·м^2	Ток двигателя, А		Относительная разница номинального и эквивалентного токов, %	Долговечность двигателя, ч
			номинальный	эквивалентный		
1	4А132S4У3 (7,5 кВт)	47	8,74	14,65	67,9 (перегрузка)	1,16
2	4А132М4У3 (11 кВт)		12,67	16,11	27,2 (перегрузка)	719
3	4А160S4У3 (15 кВт)		16,90	17,92	6,04 (перегрузка)	10 299
4		55	16,90	16,44	−2,72 (недогрузка)	26 715
5		52,52	16,90	16,83	−0,41 (недогрузка)	20 912
6		52,21	16,90	16,91	0,059	19 984
7	4А132М4У3 (11 кВт)	67	12,67	13,45	5,9 (перегрузка)	10 090

це одного из установившихся цикла работы оборудования будет равен номинальному току двигателя, то двигатель будет иметь нормативную долговечность. Перегрузка двигателя сокращает долговечность двигателя, недогрузка — увеличивает.

Недоиспользование ресурса машин и их элементов ухудшает экономические показатели производственных структур. Часто за время эксплуатации прессов двигатели не вырабатывают свой ресурс, и появляется возможность увеличения нагрузки двигателя за счет приемлемого сокращения срока его службы. Это предопределяет необходимость расчета долговечности двигателя при нагрузке, отличающейся от номинальной.

Согласно правилу Монтзингера [2], повышение температуры изоляции обмоток на 8...10 °С приводит к сокращению долговечности двигателя в 2 раза. Тогда при нормативной долговечности двигателя $T_н$ его фактическая долговечность:

$$T = \frac{T_н}{2^{\left(\frac{\Delta\tau}{9}\right)}}, \qquad (1)$$

где $\Delta\tau = \tau - \tau_н$ — превышение температуры изоляции обмотки τ над ее номинальной температурой $\tau_н$, определяемой в соответствии с классом ее нагревостойкости [2].

Учитывая, что эквивалентный ток — это "греющий" ток и его тепловой эффект прямо пропорционален его квадрату, а теплоотдача двигателя прямо пропорциональна разности температур двигателя и среды, то при отличии эквивалентного тока двигателя $I_{экв}$ от номинального $I_н$

$$\frac{I_{экв}^2}{I_н^2} = \frac{\tau - \tau_с}{\tau_н - \tau_с},$$

где $\tau_с$ — температура окружающей среды, откуда

$$\tau - \tau_н = \left(\frac{I_{экв}^2}{I_н^2} - 1\right)\left(\tau_н - \tau_с\right). \qquad (2)$$

Тогда формула (1) с учетом (2) примет вид

$$T = T_н \frac{1}{2^{\left(\frac{\Delta\tau}{9}\right)}} = T_н \frac{1}{2^{\left(\frac{\left(\frac{I_{экв}^2}{I_н^2}-1\right)(\tau_н-\tau_с)}{9}\right)}}, \qquad (3)$$

где $T_н$ = 20 000 ч; $\tau_с$ = 35 °С.

В таблице подбора двигателя и маховика для пресса К460 [4] в качестве дополнения приведены рассчитанные по формуле (3) значения долговечности двигателя для различных этапов подбора при $\tau_н$ = 105 °С (класс изоляции А).

Согласно данным таблицы возможна замена двигателя 4А160S4У3 мощностью 15 кВт (3-я строка таблицы) двигателем 4А132М4У3 мощностью 11 кВт (7-я строка) при сокращении долговечности двигателя до 10 090 ч.

zp318.indd 138 20.03.2018 14:18:21

Выводы

1. Выбор двигателя для известных условий его работы целесообразно осуществлять на основе определения его долговечности.

2. Возможность расчета долговечности двигателей позволяет полностью использовать их ресурс.

3. Расчет долговечности двигателей главного и вспомогательных приводов кривошипных прессов в режимах работы, отличающихся от номинального, возможен на основе математического моделирования работы пресса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л.** Испытания и надежность электрических машин. М.: Высшая школа, 1988. 232 с.

2. **Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А.** Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1989. 239 с.

3. **Электрооборудование** кузнечно-прессовых машин: справочник / В.Е. Стоколов, Г.С. Усышкин, В.М. Степанов и др. М.: Машиностроение, 1981. 304 с.

4. **Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н.** Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для вузов / под ред. Л.И. Живова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 560 с.

5. **Кузнечно-штамповочные** машины: сб. статей. Междунар. издательский дом LAP Lambert Academic Publishing, 2015. С. 42—56.

Евгений Николаевич Складчиков, д-р техн. наук,
ns_0@mail.ru;
Александр Владимирович Лазуткин

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Леликов О.П.

ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ: справочник

М.: Инновационное машиностроение, 2017. 667 с.

Цена 4000 руб.

Рассмотрено контактное взаимодействие деталей подшипника. Приведены общие технические требования, технические характеристики подшипников качения, рекомендации по конструированию, монтажу и обслуживанию подшипниковых узлов. Приведены также технические данные новых типов подшипников: класса исполнения Explorer, сенсорных, с керамическими телами качения, с встроенными защитными шайбами или уплотнениями, с электроизолирующими, противоизносными покрытиями. Приведена номенклатура современных российских и зарубежных подшипников.

Изложена новая методика расчета ресурса подшипников, позволяющая учесть возможную степень загрязнения смазочного материала, качество изготовления и габариты подшипника.

Большое внимание уделено конструкциям уплотнений подшипниковых узлов, схемам установки подшипников и конструктивному оформлению опор на валах и в корпусах.

Представленные материалы сопровождаются многочисленными примерами расчета.

Для инженеров-конструкторов и специалистов всех отраслей промышленности, может быть полезен также слушателям факультета повышения квалификации, студентам вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

zp318.indd 139 20.03.2018 14:18:21

УДК 669.131.22

Н.И. Габельченко, А.А. Белов, Н.А. Кидалов
(Волгоградский государственный технический университет)

Повышение срока службы рабочих элементов смесителей-пневмонагнетателей

Проведены сравнение срока службы рабочих элементов смесителей-пневмонагнетателей — лопаток, выбор оптимального материала и разработка технологии изготовления лопаток, обладающих заданными свойствами. Приведены преимущества использования разработанного состава белого чугуна для изготовления лопаток смесителей-пневмонагнетателей.

Ключевые слова: чугун; сталь; лопатки; рабочие элементы смесителя-пневмонагнетателя.

Comparison of the service life of the working elements of the mixer-pneumatic blowers — blades, the choice of the optimal material and the development of the technology for producing of blades with specified properties are performed. Advantages of using of developed composition of white cast iron for manufacturing of blades mixer-pneumatic are presented.

Keywords: cast iron; steel; blades; working elements of mixer-pneumatic blower.

В настоящее время проблема износа расходных материалов для смесителей — пневмонагнетателей стала актуальной ввиду отсутствия централизованных поставок и наличия неконтролируемых поставщиков на российском рынке металлопродукции.

Принцип работы смесителя — перемешивание полусухого раствора, в состав которого входят цемент, песок, вода, рубленая базальтовая нить, и подача готового раствора к месту укладки.

Перемешивающим элементом смесителя являются лопатки, работающие в условиях абразивного износа. В качестве материала для лопаток и лопастей используются чугуны и износостойкие стальные сплавы. Различны и технологии изготовления лопаток — из листового проката или литьем.

В последние годы широко применяют износостойкую листовую сталь Hardox 450 (Швеция) твердостью 450 HB, предназначенную для условий, к которым предъявляются особые требования по износостойкости [1, 2].

Для литейной технологии изготовления лопаток смесителей-пневмонагнетателей характерно использование различных сплавов на основе железа, начиная со стали 15, усиленной наплавкой, до высокоуглеродистых сплавов — чугунов.

Нередко лопатки смесителей-пневмонагнетателей не выдерживают срок службы, заявленный поставщиками. Поэтому была поставлена задача изготовления рабочих элементов смесителей-пневмонагнетателей — лопаток, обладающих высоким и гарантированным сроком службы.

Для сопоставления срока службы рабочих элементов смесителей-пневмонагнетателей в производственных условиях со сроком службы, заявленным поставщиками, были выбраны лопатки, изготовленные из чугуна СЧ 25, стали 15, усиленной наплавкой сталью Х10, стали 110Г13Л и износостойкой стали Hardox 450 [1, 2].

Фиксировали произведенное смесителем-пневмонагнетателем количество полусухого раствора (цемент, песок, вода) до выхода из строя перемешивающих смесь рабочих элементов — лопаток.

Применяли одинаковые смесители, строительный раствор и конфигурации лопаток. В эксперименте было задействовано четыре смесителя-пневмонагнетателя СО—241. Смесители начинали работу одновременно. Результаты эксперимента приведены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, лопатками, изготовленными из чугуна СЧ 25 произведено на 60 % меньше раствора, чем было заявлено поставщиками, из стали Hardox 450 — на 20 % меньше, из стали 15, усиленной наплавкой сталью Х10, — на 40 % меньше. Лопатки из стали 110Г13Л сохранили служебные свойства прак-

zp318.indd 140 20.03.2018 14:18:21

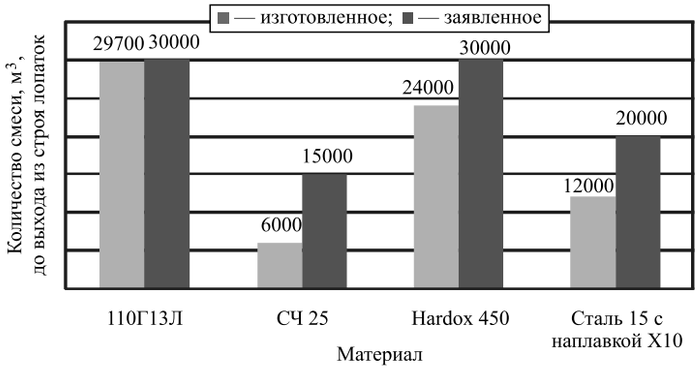


Рис. 1. Заявленное и изготовленнное количество смеси до выхода из строя лопаток из различных материалов

тически до полного завершения контрольного срока.

Учитывая высокую себестоимость стали 110Г13Л и определенные трудности производства отливок из нее, был разработан состав белого чугуна, легированного хромом и марганцем, приемлемый по цене и показавший сопоставимые со сталью 110Г13Л результаты на износостойкость в лабораторных испытаниях. Одновременно была поставлена задача по увеличению срока службы таких лопаток.

Была изготовлена опытная партия отливок из легированного хромом и марганцем чугуна, так как эти легирующие элементы препятствуют процессу графитизации, что гарантированно позволяет получить белый чугун с высокой твердостью.

По размерам двух различных по конфигурации лопаток, применяемых в смесителях-пневмонагнетателях, были изготовлены деревянные модели толщиной 10 мм с литейными уклонами и двумя отверстиями диаметром 10 мм (рис. 2).

Для получения отверстий в отливках использовали стержни, изготовленные из смеси на органическом связующем материале [3, 4], обладающие хорошей выбиваемостью и обеспечивающие необходимое качество поверхности.

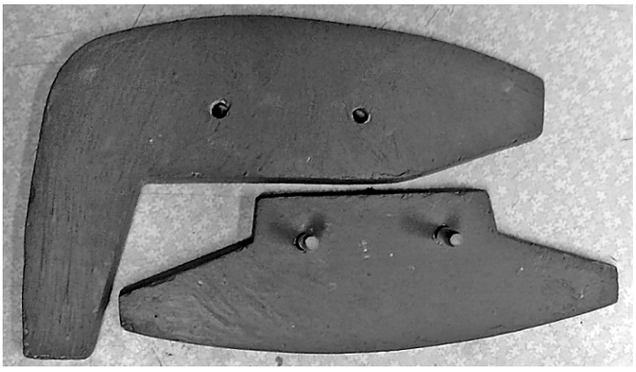


Рис. 2. Модели лопатки смесителя-пневмонагнетателя

Состав стержневой смеси представлен в табл. 1.

1. Состав стержневой смеси [3]

Компонент смеси	Количество, мас. ч.
Песок марки $2K_2O_202$	95
Лигносульфанаты технические	3
Фильтро-прессовый осадок горчицы	2

Стержни сушили в электрокамерной печи сопротивления ЭКПС—10 при температуре 240...260 °С. Время отверждения стержней 30 мин.

Для формовки использовали песчано-глинистую формовочную смесь.

В состав шихты входили лом стальной покупной (ГОСТ 2787—75), чугун литейный (ГОСТ 4832—95), феррохром (ГОСТ 4757—91), ферромарганец (ГОСТ 4755—91). Плавку шихты осуществляли в индукционной печи ИСТ-006.

Для снятия внутренних напряжений отливки подвергали низкому отпуску в электрокамерной печи СНОЛ 80/12.

Одновременно с формовкой и заливкой лопаток изготовляли образцы-свидетели для определения химического состава, проведения металлографических исследований и определения механических свойств полученных отливок.

Химический состав полученного чугуна приведен в табл. 2.

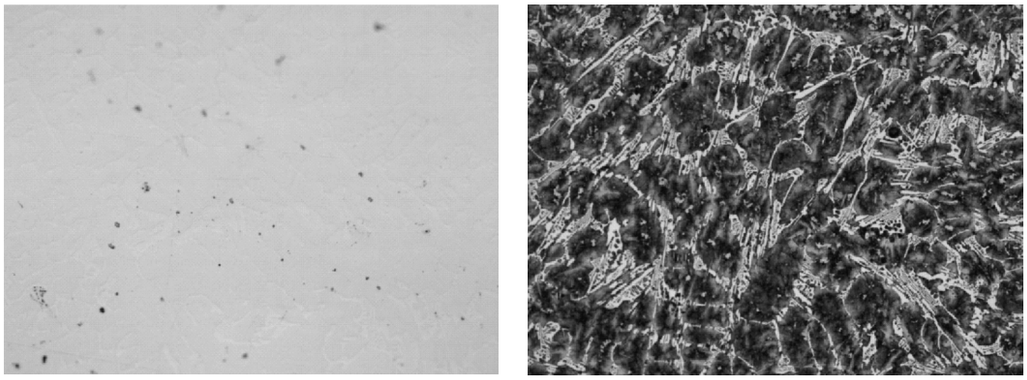
2. Химический состав белого чугуна, %

C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
2,53	2,09	1,36	5,15	0,093	0,030	0,0050

Для проведения металлографических исследований изготовляли микрошлиф металла образца-свидетеля. Оценивали наличие и форму графита в чугуне. Для изучения действительной микроструктуры проводили травление 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Микроструктуры образцов белого чугуна представлены на рис. 3.

zp318.indd 141 20.03.2018 14:18:21



а) *б)*

Рис. 3. Микроструктуры образцов белого чугуна (×200):
а — нетравленая структура; *б* — действительная структура

Как видно из рис. 3, легирование чугуна марганцем затормозило выделение графита и способствовало размельчению перлита и отбеливанию чугуна, введение хрома повысило прочность и твердость отливок, замедлило процесс графитизации углерода. Полученное в составе чугуна соотношение углерода, марганца и хрома при взаимодействии с серой нейтрализовало ее вредное действие. Незначительное количество мелких включений графита имеет хлопьевидную форму (см. рис. 3, *а*). На рис. 3, *б* видно, что действительная структура чугуна — перлит и ледебурит.

Твердость исследуемого чугуна составила 415 НВ.

Изготовленная опытная партия отливок из легированного белого чугуна была испытана в производственных условиях. Результаты испытания показали, что лопатки, изготовленные из разработанного материала, превысили срок службы лопаток из стали 110Г13Л на 10 %.

Таким образом, в результате работы был повышен срок службы лопаток, что позволяет рекомендовать разработанный состав чугуна и технологию получения отливок для изготовления рабочих элементов смесителей-пневмонагнетателей.

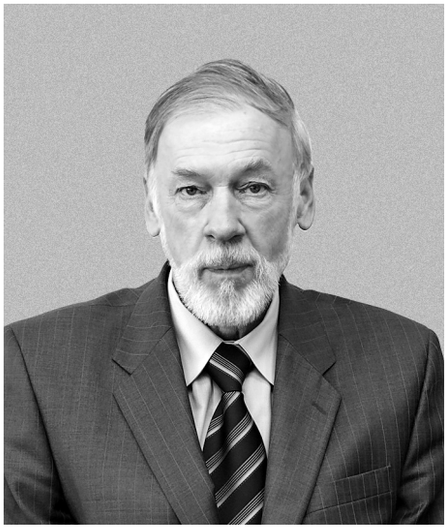
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исследование** износостойких материалов лопаток для смесителей-пневмонагнетателей / Н.И. Габельченко, А.Ал. Белов, Н.А. Кидалов, А.И. Габельченко, Н.В. Волкова // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 1. С. 175—178.
2. **Исследование** металлов лопаток смесителя-пневмонагнетателя / А.Ал. Белов, Р.И. Искендеров, О.А. Мишустин, Н.И. Габельченко, Е.Ю. Карпова // "Страна живет, пока работают заводы": сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. (9—10 дек. 2015 г.) / отв. ред. О.В. Овчинкин; Юго-Западный гос. ун-т и др. Курск, 2015. С. 52—55.
3. **Исследование** свойств стержневых смесей теплового отверждения с использованием остаточных продуктов переработки семян горчицы / Н.А. Кидалов, Н.А. Осипова, О.О. Чертова, И.Е. Поташова // Литейщик России. 2012. № 1. С. 43—46.
4. **Пат. 2449855 Российская Федерация, МПК В 22 С 1/24.** Связующее для стержней теплового отверждения литейного производства / Н.А. Кидалов, Н.А. Осипова, О.О. Чертова, И.Е. Поташова, Д.О. Алиев, И.В. Киселев; ВолгГТУ. 2012.

Наталья Ильинична Габельченко, канд. техн. наук,
mitlp@vstu.ru;
Артем Алексеевич Белов;
Николай Алексеевич Кидалов, д-р техн. наук

ООО "Издательство "**Инновационное машиностроение**", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 08.02.2018. Подписано в печать 15.03.2018. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

zp318.indd 142 20.03.2018 14:18:21



70 лет

Николаю Александровичу Шестакову,

доктору технических наук, профессору

Николай Александрович Шестаков родился 12 марта 1948 г. в поселке Подюга Коношского района Архангельской области.

В 1971 г. он с отличием окончил Московский автомеханический институт (ныне Московский политехнический университет). В 1974 г. окончил аспирантуру по кафедре "Сопротивление материалов". С 1974 до 1979 г. работал старшим преподавателем в Центральном институте повышения квалификации руководящих работников и специалистов МИНТЯЖМАШ. В 1977 г. защитил кандидатскую диссертацию.

С 1979 по 2016 г. работал в Московском государственном индустриальном университете (ныне Московский политехнический университет).

В 2005 г. Н.А. Шестаков защитил докторскую диссертацию и ему было присвоено ученое звание профессора по кафедре "Машины и технология обработки металлов давлением".

Многолетняя трудовая деятельность Николая Александровича связана с научно-педагогической деятельностью. Профессор Н.А. Шестаков читал курсы лекций "Теория обработки металлов давлением", "Теория процессов пластической деформации", "Технология листовой штамповки".

Он является автором учебных пособий "Технология ротационной ковки и вальцовки" (издательство "Высшая школа", 1982 и 1988 гг.), "Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad. Решение задач энергетическим методом" (издательство МГИУ, 1998, 2000 и 2008 гг.), соавтором монографии "Штамповка с кручением", а также учебных пособий "Расчет и проектирование процессов объемной и листовой штамповки" (2007 г.), "Штампы для листовой штамповки (штампы простого действия)" (2010 г.). В 2011 г. издательством "Физматлит" издана его монография "Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов".

Н.А. Шестаков имеет более 120 научных и учебно-методических работ, а также 22 авторских свидетельства и патента России. Его основные научные работы — в области развития теории прогнозирования предельных параметров деформации, теории процессов комбинированного деформирования и нагружения и теории технологической наследственности, связанной с формированием деформационной анизотропии при обработке материалов с необратимой сжимаемостью.

В настоящее время Николай Александрович создает обучающие видеокурсы по применению САПР в машиностроении. Его видеокурсы, созданные в Учебном центре "Инженер": "Базовый видеокурс Creo Parametric", "Creo Parametric. Создание чертежей" и "Creo Parametric. Создание деталей из листа" пользуются популярностью у студентов и инженеров.

Н.А. Шестаков — лауреат премии Правительства РФ в области образования (2011 г.), награжден золотой (1987 г.) и серебряной (1991 г.) медалями ВДНХ СССР.

Коллектив редакции и редакционный совет журнала поздравляют Николая Александровича с юбилеем! Желаем крепкого здоровья, благополучия, новых профессиональных достижений и успехов!

zp318.indd 143 20.03.2018 14:18:21

Поздравляем

Николая Алексеевича Кидалова,

доктора технических наук, профессора

с 65-летием!

Николай Алексеевич Кидалов родился 16 марта 1953 г. в Сталинграде. В 1970 г. поступил в Волгоградский политехнический институт (ВПИ) (сейчас Волгоградский государственный технический университет) на специальность "Машины и технология литейного производства". После окончания института работал старшим инженером НИС на кафедре "Машины и технология литейного производства".

С 1984 по 1987 г. Н.А. Кидалов обучался в заочной аспирантуре на кафедре литейного производства черных и цветных металлов Киевского политехнического института. В 1987 г. он защитил кандидатскую диссертацию по специальности "Литейное производство" под руководством профессора К.И. Ващенко.

После защиты диссертации Николай Алексеевич работал в ВПИ в должностях: ассистента, старшего преподавателя, заместителя декана факультета технологии конструкционных материалов, начальника научно-исследовательской части. В 1992 г. ему было присвоено ученое звание доцента. В 2006 г. Н.А. Кидалов защитил докторскую диссертацию в диссертационном совете МАМИ, а в 2008 г. ему присвоено ученое звание профессора.

В настоящее время Николай Алексеевич возглавляет кафедру "Машины и технология литейного производства" и управление науки и инноваций Волгоградского государственного технического университета. Н.А. Кидалов руководит научным направлением "Разработка методов получения литейной формы". Проводимые им исследования посвящены решению фундаментальных и прикладных задач получения качественных отливок в песчаных формах.

Н.А. Кидалов подготовил 5 кандидатов технических наук по специальности "Литейное производство". Он является автором 1 монографии, 20 учебных пособий, в том числе четырех с грифом УМО, 62 охранных документов на объекты интеллектуальной собственности, статей в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования: РИНЦ — 171, SCOPUC — 8, CA(pt) — 26.

В 2003 г. Николай Алексеевич был награжден знаком "Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации", в 2014 г. стал лучшим менеджером Волгоградской области в номинации "Наука". Н.А. Кидалов — член экспертного совета по металлургии и металловедению ВАК РФ, является членом редакционного совета и автором журнала "Заготовительные производства в машиностроении".

Коллектив редакции и редакционный совет журнала
желают Николаю Алексеевичу крепкого здоровья, благополучия
и дальнейшей плодотворной деятельности!

zp318.indd 144 20.03.2018 14:18:21