ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Том 16 № 7 июль 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.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
СЕРИКОВА Е.А.
ОРЛОВА А.В.

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

Комаров О.Н., Жилин С.Г., Предеин В.В., Попов А.В. Влияние процессов индукционного переплава стали, полученной алюмотермией, на структуру и свойства отливок 291
Орлик Г.В., Орлик А.Г., Коростелкин А.С. Исследование особенностей формирования структуры сварного шва стали 08Х18Н10Т и ее влияние на стойкость к межкристаллитной коррозии 298

Кузнечно-штамповочное производство

Чудин В.Н. Газоформовка оболочки в условиях нелинейной вязкости материала 302
Яковлев С.С. (мл.), Коротков В.А. Способ получения рифлей на внешней поверхности цилиндрических заготовок 306

Прокатно-волочильное производство

Максимов Е.А., Устиновский Е.П. Исследование технологических параметров правки и мощности главного привода листовой правильной машины 309
Абрамов А.Н., Боткин А.В., Балышева Э.Г. Влияние физико-химических свойств смазочного материала на шероховатость поверхности деформируемой заготовки при волочении 313

Материаловедение и новые материалы

Севальнёва Т.Г., Севальнёв Г.С., Курганова Ю.А. Исследование эволюции микроструктуры гранулируемого никелевого сплава системы Ni–Cr–Mo–Al–Co в процессе горячего изостатического прессования и последующей термической обработки 317
Луц А.Р., Закамов Д.В. Термодинамическая оценка рафинирующего воздействия солей Na_3AlF_6 и Na_2TiF_6 на синтез системы Al–10 % (Ti–C) 324

Информация

Полянский С.Н., Бутаков С.В., Ольков И.С., Ледер М.О., Попов М.В., Мальцев Л.В. Методы удаления окалины и газонасыщенного слоя с поверхности полуфабрикатов из сплавов титана 328

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 № 7 July 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 specialists:
SERIKOVA E.A.
ORLOVA A.V.

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

Komarov O.N., Zhilin S.G., Predein V.V., Popov A.V. Effect of induction remelting processes of steel obtained by aluminothermy on structure and properties of castings 291
Orlik G.V., Orlik A.G., Korostelkin A.S. Study of formation features of structure of 08Kh18N10T steel weld and its effect on resistance to intercrystalline corrosion 298

Forging and Stamping Production

Chudin V.N. Gas forming of shell under conditions of non-linear viscosity of material 302
Yakovlev S.S. (Jr.), Korotkov V.A. Method for obtaining of riffles on outer surface of cylindrical blanks 306

Rolling and Drawing Production

Maksimov E.A., Ustinovsky E.P. Study of technological parameters of straightening and power of main drive of sheet straightening machine 309
Abramov A.N., Botkin A.V., Balysheva E.G. Effect of physical and chemical properties of lubricant on roughness of surface of deformable workpiece at drawing 313

Physical Metallurgy and New Materials

Seval'neva T.G., Seval'nev G.S., Kurganova Yu.A. Study of evolution of microstructure of Ni–Cr–Mo–Al–Co granular nickel alloy during hot isostatic pressing and subsequent heat treatment 317
Luts A.R., Zakamov D.V. Thermodynamic evaluation of action Na_3AlF_6 and Na_2TiF_6 salts cleaning effect on Al–10 % (Ti–C) system synthesis 324

Information

Polyansky S.N., Butakov S.V., Ol'kov I.S., Leder M.O., Popov M.V., Mal'tsev L.V. Methods for descaling and removal of gas-saturated layer from surface of semifinished items from titanium alloys 328

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"

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2018

УДК 621.74.04:669.01

О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, В.В. Предеин, А.В. Попов
(*Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)*

Влияние процессов индукционного переплава стали, полученной алюмотермией, на структуру и свойства отливок*

Рассмотрены технологические варианты получения литых заготовок с применением переплава и без него. Приведены сравнительные характеристики полученной отливки: химический состав, твердость, прочность и структура. Обоснован наиболее предпочтительный вариант получения литой заготовки с использованием алюмотермии.

Ключевые слова: алюмотермия; литая заготовка; экзотермическая реакция; переплав; структура; химический состав; угар элементов.

Technological options for obtaining of cast billets with the use of remelting process and without it are considered. The comparative characteristics of the obtained casting are presented: chemical composition, hardness, strength and structure. The most preferable variant of obtaining of cast billet using aluminothermy is substantiated.

Keywords: aluminothermy; cast billet; exothermic reaction; remelting; structure; chemical composition; fumes of elements.

Минимизация затрат при получении качественной продукции — приоритетная задача для машиностроительных предприятий с высокой металлоемкостью заготовительного производства. Значительную долю специфических расходов в таком производстве составляют затраты на шихтовые материалы. Сокращение таких затрат возможно при условии возврата материалов, являющихся побочными продуктами основного производства.

Переработка отходов кузнечных, штамповочных, металлургических и литейных подразделений предприятий: окалины, стружки черных и цветных металлов вызывает ряд затруднений, связанных с высокой долей угара компонентов при переплаве стружки [1] или необходимостью использования многостадийного процесса получения железосодержащего продукта, преимущественно связанного с получением окатышей или брикетированием и обжигом окалины [2].

Сокращение числа технологических стадий получения железосодержащего полупродукта из указанных отходов приводит к необходимости использования металлотермических восстановительных процессов. В основу процесса положена экзотермическая реакция, при которой из окалины, представляющей собой смесь оксидов железа, посредством проведения алюмотермического окислительно-восстановительного процесса извлекают железо [3].

Очевидность экономического эффекта от применения алюмотермии в производстве

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00.

обусловлена низкой стоимостью материалов (отходов), а также возможностью получения стального расплава без применения традиционного оборудования, работу которого должна обеспечивать специализированная инфраструктура предприятия.

Процесс алюмотермии широко применяют в качестве сопутствующего основному технологическому процессу получения литья или металлов, например: для экзотермического обогрева прибылей отливок [4, 5], для питания отливок [6, 7], для модифицирования и легирования [8, 9] и т.д.

Значительно реже алюмотермические процессы используют в качестве основного технологического, например, для получения отливки целиком [10]. Причиной этого является высокая температура процесса в пиковой фазе (более 2500 °С). Металл, восстановленный в ходе алюмотермии, попадает в форму перегретым, вследствие чего повышается вероятность анизотропии изделия.

Предварительная выдержка металла в промежуточном ковше также сопряжена с рядом проблем: необходимость использования высокоугнеупорной, как правило, углеродной или магнезитовой оснастки; тщательный подбор и подготовка компонентов термитной шихты, определяющей элементный состав будущей отливки.

Неравномерность распределения элементов и структур в теле отливки является, как правило, следствием высокой температуры процесса, зависящей от его скорости и иногда приводящей к закипанию металла на стадии его плавления. Условия кристаллизации металла, поступающего в литейную форму в перегретом состоянии, в значительной степени зависят от высоты отливки, характера отведения теплоты от ее массивных элементов и определяют структуру и свойства будущего изделия.

Установлено, что с повышением скорости процесса увеличивается температура реакции, которая определяет полноту восстановления и поступление элементов в металл, их окисление и переход в шлак, кипение и выход в газовую фазу [11]. Указанные процессы могут проходить последовательно и параллельно.

Необходимость поиска методов и средств дополнительной обработки расплава металла, получаемого в результате алюмотермии и его выдержки до требуемой температуры для управления формированием структуры и свойств отливок, определяет актуальность исследования.

В связи с этим *целью работы* является определение влияния процессов дополнительного переплава стали, полученной алюмотермией, на структуру и свойства отливок.

В рамках поставленной цели решали следующие задачи:

— подбор материала огнеупорной оснастки и ее изготовление;

— изготовление типовой отливки прямой заливкой расплава металла, полученного алюмотермией в огнеупорном реакторе, расположенном над литейной оснасткой, регистрация структуры и физико-механических свойств изделия (технология № 1);

— изготовление типовой отливки заливкой расплава металла, полученного в результате алюмотермического процесса с последующим переплавом в индукционной печи, регистрация структуры и физико-механических свойств изделия (технология № 2);

— анализ результатов, сравнительная характеристика литых изделий и определение эффективного технологического процесса.

Внепечное получение стального расплава в ходе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в металлургии, позволяющее сократить энергозатраты, целесообразно проводить в высокоогнеупорном реакторе. В качестве огнеупорного материала для изготовления реактора и литейной оснастки предпочтительно использовать углеродные материалы, способные сохранять прочность при температурах до 3500 °С. Эти материалы являются относительно недорогими, а их механическая обработка в сравнении с оксидными огнеупорами — простая.

Материал, размеры и толщина формы, а также конфигурация и масса отливки оказывают влияние на структуру и свойства последней, поэтому выбор геометрии реактора и оснастки проводили с учетом указанных параметров и свойств термитных смесей. В качестве экспериментальной отливки выбрана отливка типа "конус", представляющая собой элемент винтовой сваи. К числу требований, предъявляемых к данной отливке, относится обеспечение прочностных харак-

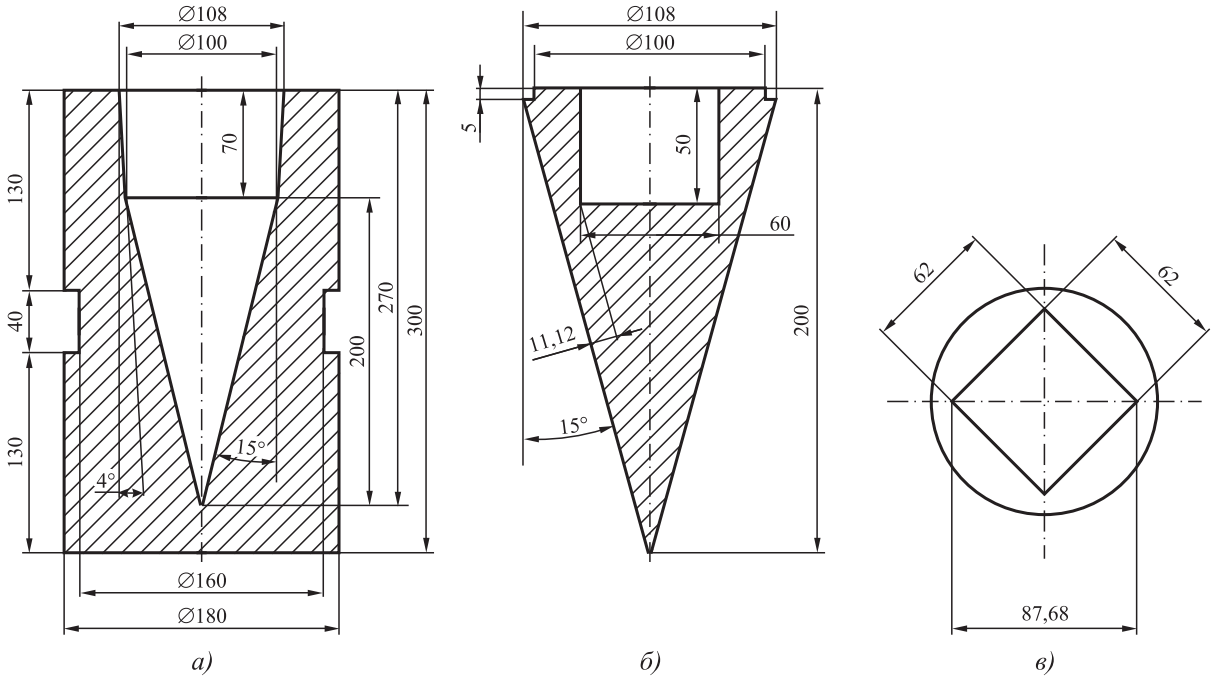


Рис. 1. Габаритные размеры формы и отливки типа "конус":

а — разрез формы; *б* — разрез отливки; *в* — вид сверху отливки

теристик при работе в условиях знакопеременных нагрузок.

Геометрия реактора и оснастки в виде тела вращения наименее трудоемка в изготовлении. Литейную форму и реактор производили точением из массива графитированного боя электродов (ЭГ15 по ТУ 14-139-177—2003), применяемых для плавки стали в электродуговых печах.

На рис. 1 приведены габаритные размеры литейной формы и отливки типа "конус".

На рис. 2 показаны литейная форма и реактор для получения отливки по технологии № 1.

Последовательность получения отливки по технологии № 1 следующая:

— загрузка в реактор *1* (см. рис. 2, *б*) термитной смеси без предварительного нагрева;

— возбуждение алюмотермитного процесса в реакторе *1*;

— слив железоуглеродистого расплава, полученного в результате реакции, в проме-

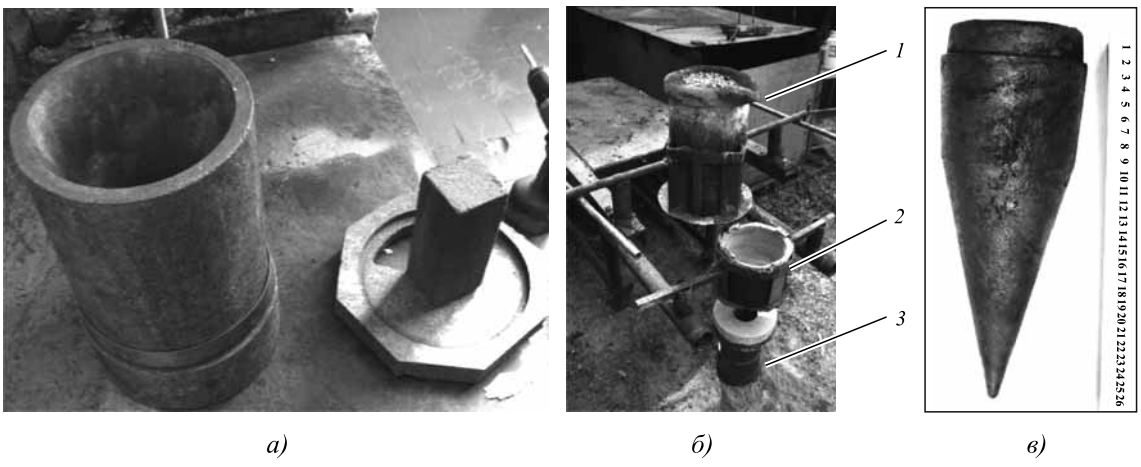


Рис. 2. Литейная форма и реактор для получения отливки:

а — графитовая форма (слева) и крышка со стержнем (справа); *б* — реактор и форма в сборе с размещенным над ней промежуточным ковшом для отстаивания и выпуска расплава в форму; *в* — отливка типа "конус"

1. Химический состав основных компонентов шихты, % мас.

Материал	O_2	Zn	C	Si	Mn	Fe	S	P	Al	Ni	Mg	Cr	Cu
Стружка алюминиевого сплава	—	2,961	—	1,097	0,304	0,166	—	—	89,443	0,008	3,917	0,062	2,040
Железная окалина	22,639	—	0,150	2,960	1,188	71,500	0,030	0,030	0,697	0,188	—	0,173	0,444

жуточный ковш *2*, выдержка в нем расплава в течение 0,5 мин (для гомогенизации, разделения металлической и шлаковой фаз);

— слив металлической фазы в форму *3* со скоростью 1 кг/с;

— остывание и выбивка отливки, удаление остатков стержня.

Железоалюминиевый термит представляет собой механическую смесь порошков алюминия и окалины [3]. Приготовление термитной шихты заключается в перемешивании фракций ее компонентов. Для получения расплава использовали термитную смесь, состоящую на 75 % из окалины и на 25 % из восстановителя (стружки алюминиевого сплава), химический состав которых приведен в табл. 1 [12].

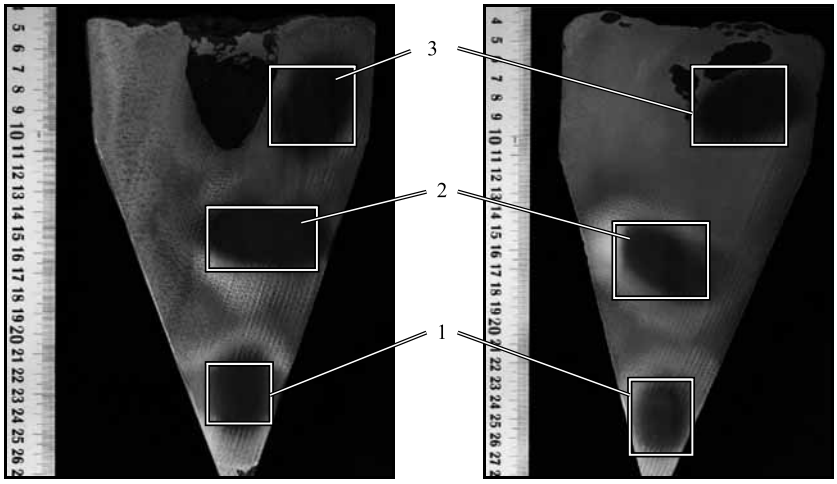
Масса термитной смеси для одной отливки, представленной на рис. 1, составляет 16 кг при выходе термитного металла 47,5 %. При получении расплава начальная температура шихты 25 °С, а температура формы 200 °С. Перед применением форму и тигель нагревали до 150 °С и окрашивали огнеупорным составом, содержащим: маршалит — 20 %; жидкое стекло — 5 %; воду — 74 %; борную кислоту — 1 %.

Выбранный температурный режим шихты и формы обеспечивает получение отливки массой 7,5 кг с удовлетворительным качеством поверхности, без внешних дефектов и недоливов (рис. 2, *в*). В дальнейшем к литой заготовке после проведения подготовительных мероприятий требуется приварить лопасть для изготовления головки винтовой сваи, которая должна соответствовать предъявляемым к ней прочностным и эксплуатационным характеристикам. Последние обеспечиваются совокупностью механических свойств, на которые влияют структура материала, его химический состав и их распределение в объеме изделия.

Для определения возможности дальнейшего использования литой заготовки по назначению отливку типа "конус" распиливали вдоль оси симметрии, как показано на рис. 3, *а*. Объем раковины в тепловом узле отливки, полученной по технологии № 1, свидетельствует о наличии неоднородности свойств и проявлении структурных напряжений.

Для устранения недостатков технологии № 1 последовательность получения отливки изменена: добавлена операция обработки железоуглеродистого расплава в индукционной печи, изменено время выдержки расплава в промежуточном ковше.

Для реализации технологии № 2 железоуглеродистый сплав, полученный алюмотермией, дополнительно переплавляли в индукционной плавильной установке ИСТ-0,06 с основной набивной футеровкой, выполнен-



а) *б)*

Рис. 3. Участки поверхности сечения отливок, полученных по технологии № 1 (*а*) и № 2 (*б*), в которых определены микротвердость HV, структура и химический состав:

1 — вершина конуса; 2 — центр конуса; 3 — основание конуса

ной из порошка плавленого магнезита марки ППМОИ-93-II-III-IV-VI.

Слив полученного расплава из индукционной печи осуществляли при температуре 1590 °С в промежуточный ковш, из которого затем расплав разливали по литейным формам. Температура подогрева промежуточного ковша и литейных форм перед заливкой составляла 200 °С, что позволяет предотвратить вскипание влаги, присутствующей в материале ковша и формы и, следовательно, исключить образование газовых дефектов. Температуру расплава перед разливкой определяли инфракрасным пирометром "Кристалл С-500.7".

Поверхность отливки, полученной по технологии № 2, не имеет существенных внешних дефектов. Визуальным осмотром поверхности сечения такой отливки установлено отсутствие газовой пористости и недоливов (рис. 3, *б*).

Преимущества и недостатки технологий № 1 и 2 определяли в ходе сравнительного анализа значений поверхностной твердости, химического состава и структур материала отливок в контрольных точках участков (см. рис. 3).

В табл. 2 приведены химический состав и микротвердость отливок, полученных по технологиям № 1 и 2, в контрольных участках. Химический состав определяли на оптико-эмиссионном спектроанализаторе Q4 TASMAN170 BRUKER, а микротвердость по методу Виккерса — согласно ГОСТ 2999—75.

Из анализа данных табл. 2 видно, что значения микротвердости верхних (наиболее массивных) зон отливки ниже, чем в участках № 1 в среднем на 3,8 % для каждой из технологий. Однако металл отливки, полученной по технологии № 1, обладает большей микротвердостью, чем металл отливки, полученной по технологии № 2. Расхождение средних значений микротвердости достигает 14 %.

На микротвердость оказывает влияние химический состав материала отливки (см. табл. 2). Существенных расхождений значений содержания химических элементов в различных участках отливок не наблюдается. Это характерно для металла отливок, полученных по двум технологиям. Равномерность распределения химических элементов обеспечивается интенсивным взаимодействием компонентов термитных смесей, во время которого расплав эффективно перемешивается. При прохождении алюмотермической реакции интенсивно протекают диффузионные процессы, обусловленные высокими температурами продуктов реакции, что определяет выравнивание химического состава в результате миграции химических элементов по участкам расплава с разной концентрацией.

Однако переплав приводит к значительному изменению содержания элементов в отливке, определяемых угаром примесей (см. табл. 2). Наибольшее сокращение содержания элемен-

2. Химический состав и микротвердость отливки типа "конус" из термитного металла в контрольных участках

Номер участка	Химический состав, % мас.								Микротвердость, HV
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	Fe	
1	0,347*/0,331	0,564/0,381	0,402/0,245	0,147/0,066	0,278/0,234	1,178/1,001	2,820/0,137	94,308/97,605	213/179
2	0,340/0,314	0,549/0,376	0,399/0,247	0,146/0,065	0,279/0,235	1,172/0,975	2,650/0,139	94,509/97,649	202/176
3	0,344/0,312	0,555/0,400	0,396/0,245	0,143/0,066	0,273/0,220	1,059/0,965	2,800/0,136	94,483/97,656	201/172
Среднее значение	0,344/0,319	0,556/0,385	0,399/0,246	0,145/0,066	0,277/0,229	1,136/0,980	2,757/0,137	94,433/97,634	204/176
Угар, %	7,27	38,75	38,34	54,48	17,32	13,73	95,03	—	—

* В числителе приведены данные для отливки, полученной по технологии № 1, а в знаменателе — по технологии № 2.

тов в экспериментальном сплаве после переплава отмечено по алюминию, хрому, марганцу и кремнию. При переплаве на поверхности металла получено повышенное шлакообразование. Данное обстоятельство необходимо учитывать при корректировке составов шихты для традиционных процессов переплава, содержащих термитные металлы.

Также установлено, что содержание остаточного алюминия в сплаве при использовании увеличивающихся партий термитных композиций снижается, что обусловлено более продолжительной выдержкой расплава перед заливкой и более высокими температурами продуктов реакций. Поскольку железо является основным компонентом исследуемых сплавов, то учет доли его угара в сравнении с безвозвратными потерями легирующих элементов после переплава принципиально не важен и определяет только массовый выход металла.

Более значимым с практической точки зрения является соотношение химических элементов в сплаве, полученном после индукционного переплава. Химический состав сплава, полученного алюмотермическим процессом, формируется скоротечно при температурах свыше 2500 °С, определяющих преимущественно восстановительные реакции примесных химических элементов и, соответственно, их высокое содержание в сплаве. В ходе индукционного переплава железоуглеродистого сплава, полученного алюмотермией, температура расплава не превышает 1700 °С, в результате чего наблюдаются интенсификация окислительных реакций и снижение содержания примесных элементов. Равновесное содержание химических элементов между фазами достигается за счет миграции большей части примесей между расплавом, шлаком и газовой атмосферой.

Химический состав и технологические условия получения отливки определяют структуру металла и, как следствие, прочностные и эксплуатационные свойства литого изделия.

На рис. 4 показаны структуры отливок, полученных по технологиям № 1 и 2 в контрольных участках (см. рис. 3).

Из рис. 4 видно, что структуры отливок, полученных после переплава (технология № 2), имеют отличия от структур отливок, полученных по технологии № 1. Так, при использовании технологии № 1 в нижней части отливки (участок № 1) наблюдается структура мартенсита с матрицей феррито-перлитного состава с присутствием остаточного аустенита. Структура сформирована высоким температурным градиентом между начальными порциями металла и формой. Интенсивное охлаждение отливки вызвало образование фаз промежуточ-

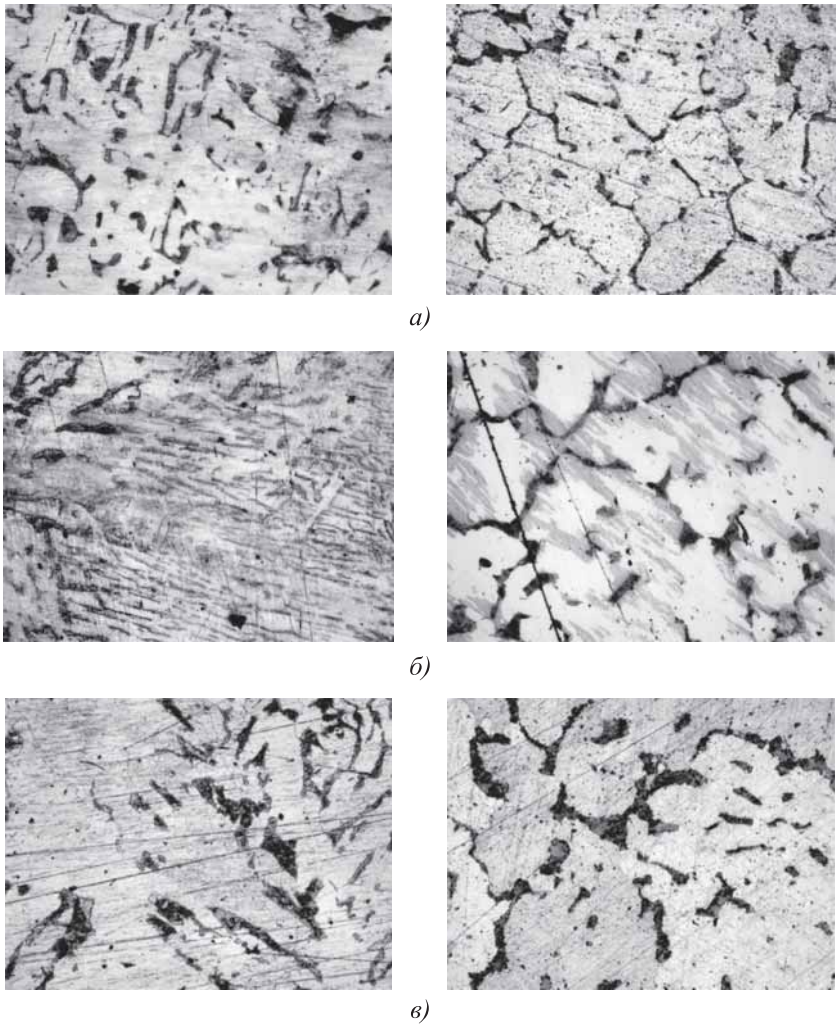


Рис. 4. Структуры (×200) термитного металла отливки типа "конус", полученные по технологии № 1 (слева) и № 2 (справа):
а — вершина конуса; *б* — центр конуса; *в* — основание конуса

ного превращения. Для участка № 1 отливки, полученной по технологии № 2, характерна структура феррито-перлитного состава с фазами промежуточного превращения.

В средней части отливки (участок № 2), структура которой приведена на рис. 4, *б* (слева), присутствует более дисперсный мартенсит, выделяющийся на фоне белой матрицы феррита. Перлит представлен отдельными группами пластинчатого типа. Структура, показанная на рис. 4, *б* (справа), характеризуется более крупным размером зерна. Перлит представлен отдельными группами пластинчатого типа по границам зерен.

Структуры массивных частей отливок также отличаются друг от друга. Так, на рис. 4, *в* (слева) видны крупные структурные составляющие, определяемые значительным объемом теплового узла. При этом в составе структуры содержится мартенсит, феррит и пластинчатый перлит, локализованный отдельными зонами. Для структуры, приведенной на рис. 4, *в* (справа), характерны более крупные составляющие с содержанием феррита и пластинчатого перлита, локализованного отдельными зонами по границам зерен.

В ряде случаев отливки, полученные по технологии № 1, при нарушении технологических рекомендаций имели брак по газовым порам, недоливам и т.д. Эти заготовки можно использовать в качестве шихты при традиционных процессах получения литых изделий.

Заключение. Установлено, что переплав с помощью традиционных плавильных агрегатов позволяет получать менее напряженную структуру с упорядоченным зерном, что влияет на физико-механические свойства заготовок и, предположительно, объясняется различием температур сплавов перед разливкой, а также ее скоростью.

При экспериментальном способе средняя скорость разливки составляет 1 кг/с. Твердость контрольных участков сплава в образце после переплава снижается в среднем на 14 %. Предел прочности и относительное удлинение материала отливок, полученных по технологиям № 1 и 2: $\sigma_{в1}$ = 524 МПа, $\sigma_{в2}$ = 470 МПа, δ_1 = 11,4 % и δ_2 = 13,4 % соответственно. Определено, что химический состав при переплаве существенно не изменяется.

Рис. 5. Изделие "головка винтовой сваи"

Отливки типа "конус", представляющие собой заготовки для наконечников винтовых свай, были включены в дальнейшую технологическую цепочку и апробированы в ООО "Строительный Альянс" (г. Хабаровск).

На рис. 5 показана отливка с наваренной на нее лопастью. Процесс наплавки металла в ходе приваривания лопасти к поверхности заготовок, полученных по технологиям № 1 и 2, существенных отличий не имеет. Однако, ввиду некоторой доли брака заготовок, полученных по технологии № 1, а также наличия структурных напряжений и меньшей прочности, для получения головки винтовой сваи рекомендовано использовать заготовки, полученные по технологии № 2, в том числе для применения в более нагруженных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Опыт** утилизации металлической стружки / Д.М. Кукуй, И.В. Емельянович, В.П. Петровский, Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин // Литье и металлургия. 2009. № 1 (50). С. 47—50.

2. **Перспективные** технологии переработки металлургической окалины / И.П. Добровольский, Н.В. Старикова, М.В. Волкова, П.Н. Рымарев // Вестник Челябинского государственного университета. 2007. № 6. С. 137—140.

3. **Новохацкий В.А., Жуков А.А., Макарычев Ю.И.** Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями. М.: Машиностроение, 1986. 64 с.

4. **Schafer J., Schafer T., Baginski T. et al.** Energy efficiency in the feeder system // Casting Plant and Technology. 2013. 29. No. 3. P. 24—28.

5. **Экзотермическая** смесь для обогрева прибылей стальных и чугунных отливок: пат. 2356689 РФ / В.И. Швецов, Б.А. Кулаков, Ю.А. Кожевников и др. // Заявл. 25.10.2007; опубл. 27.05.2009.

6. **Мельянченко Э.В., Вопсева Т.В., Эссельбах С.Б.** Разработка технологии отливки букс тепловозов с применением термитных прибылей. Коммунарск, 1988. 14 с.

7. **Открытые** термитные прибыли для стальных отливок / В.А. Новохацкий, А.А. Жуков, Ю.Ю. Жигуц, О.Н. Литвиненко // Литейное производство. 1992. N. 1. С. 28.

8. **Способ** ковшевого модифицирования серого чугуна: пат. 2387519 РФ / В.А. Алов, М.И. Карпенко, О.М. Епархин, И.Н. Куприянов, А.В. Васильев. Заявл. 27.10.2008; опубл. 27.04.2010.

9. **Экзотермическая** смесь для раскисления, рафинирования, модифицирования и легирования стали: пат. 2252265 РФ / А.Н. Шаруда, А.А. Новиков. Заявл. 13.07.2004; опубл. 20.05.2005.

10. **Способ** получения стальных отливок из термитной шихты: пат. 2634818 РФ / О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, Г.Л. Панченко, В.В. Предеин, Е.Е. Абашкин, Д.А. Потянихин, А.В. Попов. Заявл. 30.05.2016; опубл. 03.11.2017, Бюл. № 31.

11. **Получение** слябовых заготовок из кипящей стали для прокатного производства методом металлотермии / О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, В.В. Предеин, Е.Е. Абашкин, А.В. Попов // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Том 15. № 3. С. 136—140.

12. **Влияние** начальных температур шихты и формы на структуру и физико-механические свойства литых заготовок, получаемых при алюмотермитном переплаве / В.В. Предеин, О.Н. Комаров, А.В. Попов, С.Г. Жилин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. Том 19. № 4. С. 24—40.

Олег Николаевич Комаров, канд. техн. наук;
Сергей Геннадьевич Жилин, канд. техн. наук;
Валерий Викторович Предеин;
Артем Владимирович Попов,
zhilin@imim.ru

УДК 691.791

Г.В. Орлик, А.Г. Орлик, А.С. Коростелкин
(Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Исследование особенностей формирования структуры сварного шва стали 08Х18Н10Т и ее влияние на стойкость к межкристаллитной коррозии

Статья посвящена исследованию образования межкристаллитной коррозии при сварке стали 08Х18Н10Т в интервале критических температур. Проведены аргонодуговая сварка импульсной дугой и полуавтоматическая сварка в среде защитных газов образцов из исследуемой стали. Приведены структуры полученных образцов и их сравнение.

Ключевые слова: межкристаллитная коррозия; линзовый патрубок; параметры режима сварки; аргонодуговая сварка; полуавтоматическая сварка в среде защитных газов.

The article is devoted to the investigation of the occurrence of intercrystalline corrosion at welding of 08Kh18N10T steel in the critical temperature range. Pulsed argon arc welding and gas-shielded semiautomatic welding of samples from studied steel are performed. Sample structures are presented and compared.

Keywords: intercrystalline corrosion; lens nozzle; welding mode parameters; argon arc welding; gas-shielded semiautomatic welding.

Линзовый патрубок (рис. 1) широко применяют в таких отраслях промышленности, как энергетика, химическая и пищевая промышленность, машиностроение, судостроение.

Основной функцией таких устройств является снижение различного рода напряжений на фланцевые и сварные соединения, возникающих вследствие температурной деформа-

Рис. 1. Линзовый патрубок

ции трубопровода. Линзовый патрубок может растягиваться и сжиматься, компенсируя удлинение трубопровода при транспортировке горячей среды и уменьшение его длины в случае остывания металла труб. Благодаря этим устройствам значительно продлевается срок службы трубопроводов [1].

Исследовали линзовый патрубок, применяемый на плавучей насосной станции. Основные требования, предъявляемые к нему: прочность, надежность, а также устойчивость материала к воздействию агрессивных сред, в частности, морской воды. Для обеспечения эксплуатационных требований в качестве материала для изготовления линзового патрубка рекомендуется использовать хромоникелевую сталь аустенитного класса 08Х18Н10Т, обладающую повышенной сопротивляемостью к межкристаллитной коррозии (МКК).

Структура стали 08Х18Н10Т в закаленном состоянии — аустенит. Одной из основных проблем, которая возникает при сварке данной стали, является МКК. Хромоникелевые аустенитные стали становятся восприимчивыми к МКК в результате замедленного охлаждения стали, от температуры более 1000 °С или вследствие ее выдержки в критическом интервале температур 450...850 °С.

Явление МКК стали 08Х18Н10Т связывают с выделением при нагреве по границам зерен аустенита сложных карбидов железа и хрома, богатых хромом. По границам зерен содержание хрома снижается до 12 % и менее, т.е. ниже того предела, который обеспечивает коррозионную стойкость. Обедневшие хромом пограничные слои аустенита теряют свою химическую стойкость, и сталь становится склонной к МКК.

Появление чувствительности к МКК у аустенитных хромоникелевых сталей зависит от времени их выдержки при данной критической температуре. На рис. 2 приведена кривая, иллюстрирующая зависимость между температурой и временем выдержки стали 08Х18Н10Т и склонностью к МКК [2].

Установлено, что с повышением температуры нагрева стали время t_1 уменьшается от нескольких часов до нескольких минут. При достижении 800...850 °С восприимчивость к МКК отсутствует. При температурах от 450...500 до 650...700 °С скорость распада аустенита и образования хрома возрастает быстрее, чем скорость диффузии хрома. Вследствие этого сталь за более короткое время становится чувствительной к МКК [3].

При сварке исследуемого линзового патрубка параметры, режим сварки, скорость кристаллизации и охлаждения и объем сварочной ванны оказывают заметное влияние на структуру сварных швов, что влияет на склонность стали к МКК [4].

Изменение напряжения дуги при сварке линзового патрубка влияет на интенсивность металлургических процессов в дуговом промежутке. Чрезмерное увеличение напряжения дуги может усилить окисление хрома и титана. Повышение сварочного тока при постоянной скорости сварки приводит к увеличению объема сварочной ванны. При этом наблюдается заметное укрупнение структуры шва, что нежелательно с точки зрения его коррозионной стойкости. Повышение скорости сварки

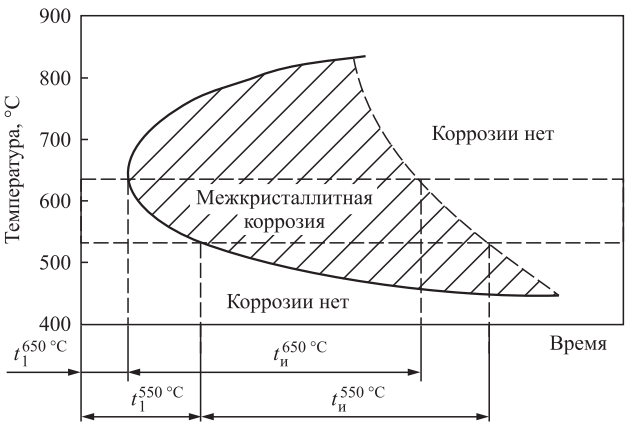


Рис. 2. Влияние температуры и времени выдержки на склонность стали 08Х18Н10Т к межкристаллитной коррозии

Параметры режима аргонодуговой и полуавтоматической сварки

Сварка	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Расход аргона, л/мин	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм
Аргонодуговая импульсной дугой	87	11	7	15	—
Полуавтоматическая в защитных газах (80 % Ar + 20 % CO_2)	114	15	9	12	20
Примечание. Толщина металла 4 мм; число проходов 1; диаметр сварочной проволоки 2 мм.					

сопровождается заметным измельчением первичной структуры сварных хромоникелевых швов. Также на измельчение структуры шва оказывает влияние скорость охлаждения сварного шва после сварки. Чем выше скорость охлаждения сварного шва, тем мельче будет зерно, что увеличивает коррозионную стойкость.

Для сокращения времени выдержки стали при сварке в области критических температур применяют различные технологические приемы (см. кн.: Медоваров Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. К.: Машгиз, 1954. 175 с).

Данный линзовый патрубок целесообразно сваривать полуавтоматической сваркой в защитных газах (80 % Ar + 20 % CO_2) и аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом импульсной дугой.

Для исследований были изготовлены пластины из листового проката стали 08Х18Н10Т размерами 300×100×4 мм. Присадочный материал — сварочная проволока Св-04Х19Н11М3. Аргонодуговая сварка проведена с частотой 1 имп./с. Параметры режимов аргонодуговой и полуавтоматической сварки приведены в таблице.

Из рис. 3 видно, что сталь 08Х18Н10Т при полуавтоматической сварке продолжительное время находится в интервале критических температур и в отличие от стали 08Х18Н10Т при аргонодуговой сварке имеет бóльшую восприимчивость к МКК.

На рис. 4 показаны структуры сварного шва, полученные при полуавтоматической сварке и аргонодуговой сварке импульсной дугой. Структура сварного шва, выполненного аргонодуговой сваркой импульсной дугой, имеет более однородную структуру, чем структура шва, выполненного полуавтоматической

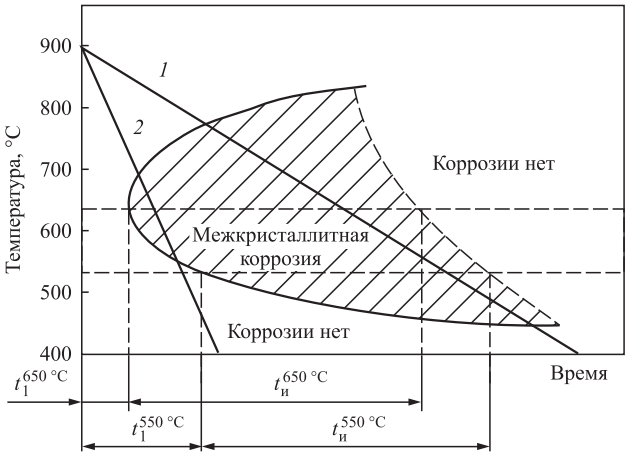
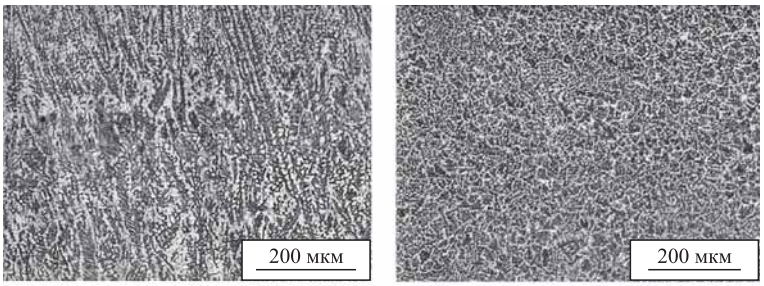


Рис. 3. Время нахождения стали 08Х18Н10Т в критическом интервале температур при полуавтоматической сварке (*1*) и аргонодуговой сварке (*2*)

сваркой. Структура сварного шва, полученного при полуавтоматической сварке, представляет собой столбчатые дендриты.

За счет импульсной дуги аргонодуговой сварки происходило более быстрое остывание сварочного шва, что привело к образованию более однородной структуры. Замедленное



а) *б)*

Рис. 4. Структуры сварного шва, полученного различными способами сварки:

а — полуавтоматическая сварка в защитных газах (80 % Ar + 20 % CO_2); *б* — аргонодуговая сварка импульсной дугой

остывание сварных швов в случае полуавтоматической сварки приводит к укрупнениию структуры шва, что в процессе эксплуатации под действием агрессивной среды может привести к МКК.

Для оценки склонности двух образцов к МКК осуществляли испытания методом АМУФ. В процессе испытаний образцы были изогнуты на угол (90 ± 5)°. Осмотр образцов проводили с помощью лупы при 16—20-кратном увеличении. Отсутствие трещин на образцах, изогнутых после испытания, за исключением продольных трещин и трещин непосредственно на кромках, свидетельствует о стойкости стали к МКК.

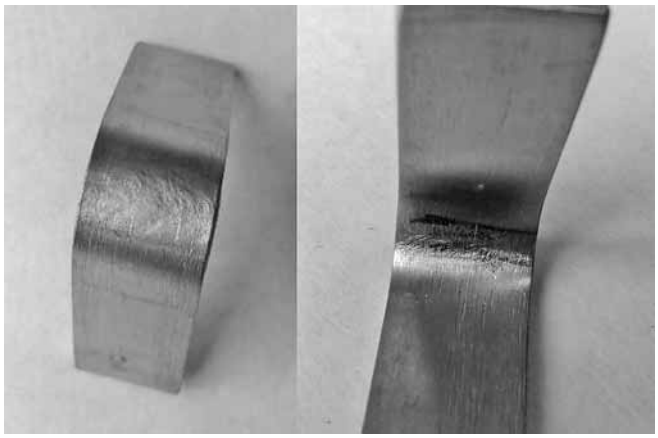


Рис. 5. Образец, сваренный аргонодуговой сваркой импульсной дугой, после испытания методом АМУФ

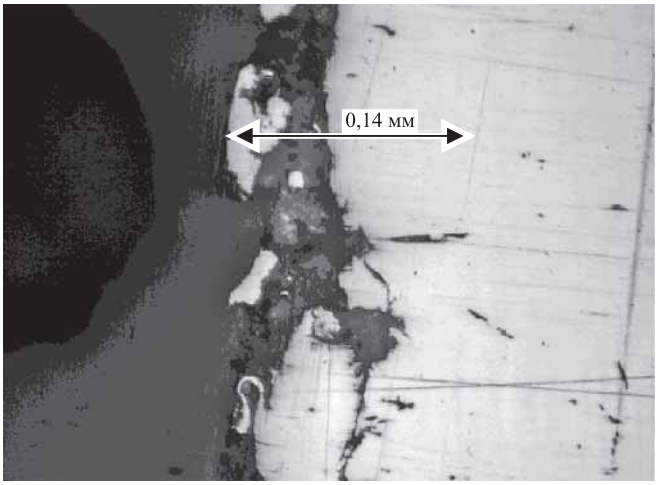


Рис. 6. Структура сварного шва стали 08Х18Н10Т, полученного полуавтоматической сваркой, после испытания методом АМУФ

На рис. 5 представлен образец, сваренный аргонодуговой сваркой импульсной дугой. Образец не имеет склонности к МКК.

На рис. 6 показана структура сварного шва, сваренного полуавтоматической сваркой, после испытания на МКК. Выявлено, что глубина коррозионного разрушения составляет 0,14 мм.

Вывод

Для обеспечения стойкости стали 08Х18Н10Т к межкристаллитной коррозии при изготовлении линзового патрубка можно рекомендовать аргонодуговую сварку импульсной дугой по режиму, приведенному в таблице, что обеспечит требуемые эксплуатационные свойства изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Орлик Г.Н., Орлик А.Г., Коростелкин А.С.** Исследование технологических факторов, влияющих на межкристаллитную коррозию при сварке линзового патрубка // Альманах современной науки и образования. 2016. № 12. С. 67—70.

2. **Каспаров О.В.** Межкристаллитная коррозия нержавеющих сталей // Технология легких сплавов. 2011. № 3. С. 86—91.

3. **Орлик Г.Н., Орлик А.Г., Коростелкин А.С.** Исследование влияния параметров режимов аргонодуговой сварки на межкристаллитную коррозию стали 08Х18Н10Т при изготовлении линзового патрубка // Успехи современной науки и образования. 2017. Том 4. № 4. С. 62—65.

4. **Лощакова Э.У.** Зависимость коррозионной стойкости сварных соединений от величины зерна аустенита // Теория и практика современной науки. 2016. № 2 (8). С. 266—269.

Геннадий Владимирович Орлик, канд. техн. наук;
Антон Геннадьевич Орлик, канд. техн. наук;
Александр Сергеевич Коростелкин,
aleksandrkorostelkin@rambler.ru

УДК 621.983.044.4.001.24

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

Газоформовка оболочки в условиях нелинейной вязкости материала

Предложены схема и расчеты для процесса формообразования газом полусферической оболочки из конической заготовки. Материал заготовки принят нелинейно-вязким при плоской схеме напряжений. Даны соотношения для оценки давления газа, повреждаемости материала и критических степеней формоизменения. Приведены результаты расчета.

Ключевые слова: вязкость; интенсивности деформаций и скоростей деформаций; давление; время; повреждаемость.

The scheme and calculations for forming process by gas of hemispherical shell from conical workpiece are offered. Material of billet adopted nonlinear-viscous at flat circuit of voltages. The ratio for evaluation of gas pressure, damage to the material and the critical degrees of forming are given. The calculation results are presented.

Keywords: viscosity; strain rate and strain rate; pressure; time; defectiveness.

Технологию формообразования оболочек давлением газа применяют в производстве корпусов емкостей из высокопрочных сплавов [1, 2]. Основным недостатком этого процесса является значительная неравномерность толщины стенки изделия. Для уменьшения неравномерности предложена технологическая схема, состоящая из предварительной неглубокой вытяжки конической заготовки [3] и последующей газоформовки полусферы.

Рассмотрим процесс газоформовки оболочки из конической заготовки. Расчетная схема формообразования показана на рис. 1.

Формообразование осуществляется в условиях изотермического нагрева. Состояние материала — нелинейная вязкость (ползучесть). Текущая поверхность заготовки на этапах операции — часть полусферы. Напряженное состояние материала — плоское. Примем условие текучести Сен-Венана и соответствующий этому условию закон течения (см. кн.: Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.), т.е.

$$\sigma_\varphi = \sigma_\theta = \sigma_i;$$
$$d\varepsilon_\varphi : d\varepsilon_\theta : d\varepsilon_\delta = 1 : 1 : -2, \quad (1)$$

где σ_i — интенсивность напряжений; σ_φ, σ_θ — напряжения меридиональные и окружные; ε_φ,

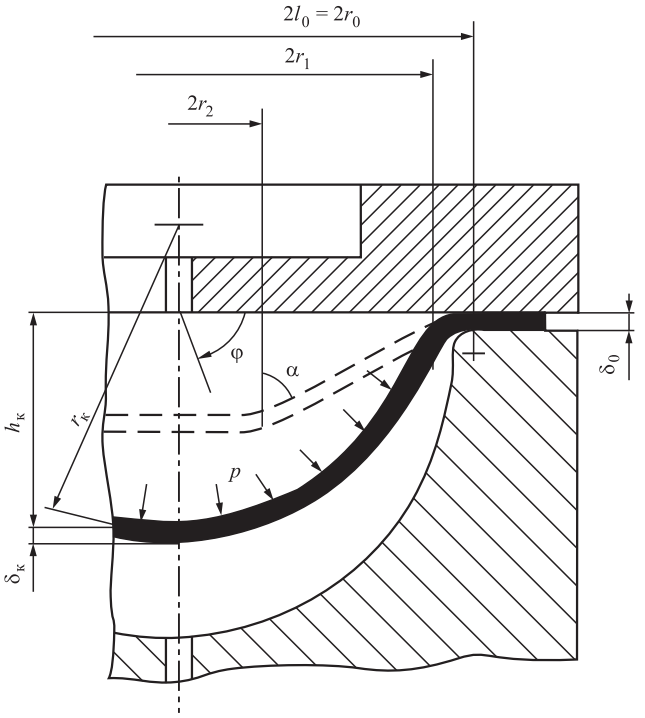


Рис. 1. Расчетная схема газоформовки оболочки

ε_θ, ε_δ — деформации по меридиональным и окружным направлениям и по толщине стенки оболочки.

В соответствии с законом течения запишем для произвольного k-этапа операции

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\theta = \ln\frac{l_k}{l_0};\ \ \varepsilon_\delta = -2\varepsilon_\varphi, \qquad (2)$$

где l_0, l_k — длина исходной заготовки и текущая длина образующей оболочки на k-этапе:

$$l_0 = \frac{r_1 - r_2}{\sin\alpha} + r_2;\ \ l_k = r_k \operatorname{arctg}\frac{r_1}{r_k - h_k}, \qquad (3)$$

где r_1, r_2 — радиальные размеры конуса исходной заготовки; r_k, h_k — радиус и высота купола оболочки на данном этапе; α — угол конуса заготовки.

Распределение интенсивностей деформаций и скоростей деформаций по образующей оболочки на этапе операции представим, учитывая выражения (2), соотношениями

$$\varepsilon_i = \frac{4\varphi}{\pi}\ln\frac{l_k}{l_0}; \qquad (4)$$

$$\xi_i = \frac{4\varphi}{\pi t_k}\ln\frac{l_k}{l_0}, \qquad (5)$$

где $0 \leqslant \varphi \leqslant \frac{\pi}{2}$ — угловая координата точки на образующей; t_k — время этапа.

Интенсивность напряжений при заданной интенсивности скоростей деформаций (5) выразим в соответствии с уравнением состояния материала в условиях нелинейной ползучести (см. кн.: Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.), т.е.

$$\sigma_i = A\xi_i^n, \qquad (6)$$

где A, n — константы материала при температуре газоформовки.

Распределение толщины материала по образующей оболочки получим из дифференциального соотношения

$$d\varepsilon_\delta = \frac{d\delta}{\delta} = -d\varepsilon_i.$$

Отсюда при учете выражения (4) следует, что

$$\delta = \delta_0\left(\frac{l_0}{l_k}\right)^{\frac{4}{\pi}\varphi}. \qquad (7)$$

Соотношения (4), (5), (7) соответствуют условиям

$$\varphi = 0,\ \ \varepsilon_i = 0,\ \ \xi_i = 0, \delta = \delta_0;$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2},\ \ \varepsilon_i = 2\ln\frac{l_k}{l_0},$$

$$\xi_i = \frac{2}{t_k}\ln\frac{l_k}{l_0},\ \ \delta = \delta_k = \delta_0\left(\frac{l_0}{l_k}\right)^2,$$

где δ_0, δ_k — исходная толщина заготовки и толщина в вершине купола оболочки соответственно.

Скорость перемещения точек, нормальную к поверхности оболочки, зададим функцией

$$v_n = \frac{2h_k}{\pi t_k}\varphi \qquad (8)$$

при условиях $\varphi = 0$, $v_n = 0$; $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $v_n = \frac{h_k}{t_k}$.

Оценку давления на k-этапе получим при учете выражений (5)—(8) по уравнению равновесия Лапласа в виде

$$p = \frac{2}{r_k}\int\delta\sigma_i d\varphi = \\ = A\frac{2\delta_0}{r_k}\left(\frac{4}{\pi t_k}\ln\frac{l_k}{l_0}\right)^n\int_0^{\frac{\pi}{2}}\varphi^n\left(\frac{l_0}{l_k}\right)^{\frac{4}{\pi}\varphi}d\varphi \qquad (9)$$

и уравнению баланса мощностей внешних и внутренних сил [4]

$$p = \int\sigma_i\xi_i dw \Big/ \int v_n ds = \\ = A\left(\frac{4}{\pi}\right)^{2+n}\frac{\delta_0}{h_k t_k^n}\left(\ln\frac{l_k}{l_0}\right)^{1+n}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\varphi^{1+n}\left(\frac{l_0}{l_k}\right)^{\frac{4}{\pi}\varphi}d\varphi. \qquad (10)$$

Расчет давления можно упростить, если принять, что

$$\delta = \frac{1}{2}(\delta_0 + \delta_k) = \frac{\delta_0}{2}\left[1 + \left(\frac{l_0}{l_k}\right)^2\right]$$

— осредненная толщина оболочки. При этом зависимости (9), (10) получат вид

$$p = \frac{\pi A\delta_0}{2(1+n)r_k}\left[1 + \left(\frac{l_0}{l_k}\right)^2\right]\left(\frac{2}{t_k}\ln\frac{l_k}{l_0}\right)^n; \qquad (11)$$

$$p = \frac{A\delta_0}{(2+n)h_k t_k^n}\left[1 + \left(\frac{l_0}{l_k}\right)^2\right]\left(2\ln\frac{l_k}{l_0}\right)^{1+n}, \qquad (12)$$

где l_0, l_k определяют по выражениям (3).

Давление, как следует из зависимостей (9)—(12), тем меньше, чем больше время формообразования.

В процессе газоформовки в вершине купола оболочки увеличивается повреждаемость материала ω. Сделаем оценку повреждаемости по уравнениям энергетической и деформационной теорий прочности при ползучести [1]. Учтем при этом выражения (4)−(6). По энергетической теории имеем

$$\omega=\frac{1}{A_{\text{пр}}}\int\sigma_i\xi_i dt=\frac{A}{A_{\text{пр}}t_k^n}\left(2\ln\frac{l_k}{l_0}\right)^{1+n}, \qquad (13)$$

где $A_{\text{пр}}$ — предельная удельная работа.

По деформационной теории

$$\omega=\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i\,\text{пр}}}=\frac{2}{\varepsilon_{i\,\text{пр}}}\ln\frac{l_k}{l_0}, \qquad (14)$$

где $\varepsilon_{i\,\text{пр}}$ — предельная интенсивность деформаций к моменту разрушения.

Зависимость (13) относится к материалам, повреждаемость которых определяется степенью деформации и временем формообразования. Зависимость (14) применима для материалов, повреждаемость которых определяется степенью деформации независимо от времени. Критические условия операции следуют из этих зависимостей при ω = 1, т.е.

$$\left(\frac{l_k}{l_0}\right)_{\text{кр}}=\exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{A_{\text{пр}}}{A}t_k^n\right)\right]^{\frac{1}{1+n}}; \qquad (15)$$

$$\left(\frac{l_k}{l_0}\right)_{\text{кр}}=\exp\frac{1}{2}\varepsilon_{i\,\text{пр}}. \qquad (16)$$

Расчеты и технологические работы выполнены для газоформовки полусферической оболочки r_1 = 150 мм; δ_0 = 2 мм из титанового сплава ВТ6С при температуре 930 °С. Использовали плоскую листовую заготовку r_0 = 170 мм и тянутую коническую высотой h = 40 мм с углом конусности α = 45...55°. Константы уравнений состояния приняты по данным работы [1].

В технологических работах применяли беспрессовый штамповый блок с клиновым зажимом верхней и нижней частей. Конструкции матрицы из стали 12Х18Н10Т были двух типов: наборная из колец и цельная литая с внешними ребрами жесткости. Штамповый блок оснащен встроенной системой нагрева, асбестовой и керамической теплоизоляцией, водяной системой охлаждения. Подача газа (аргона) в оснастку осуществлялась от баллона.

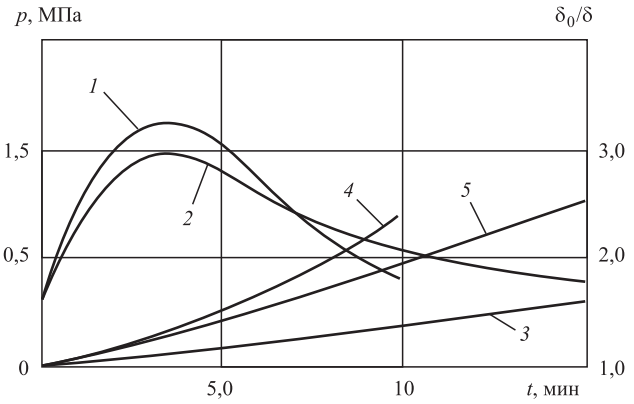


Рис. 2. Графики давления и относительной толщины в вершине купола:

1, *2* — давление при t_k = 10 и 15 мин соответственно; *3* — толщина при конической заготовке; *4*, *5* — толщина при плоской заготовке

Графики параметров процесса приведены на рис. 2. Процесс зависит от скоростных условий обработки. Повышение скорости деформирования вызывает рост давления и вероятность разрушения заготовки. Максимальное давление газа составляло 1,7...2 МПа при конечном времени операции 10 мин и 1,4...1,5 МПа при 15 мин. Увеличение длительности процесса в 1,5 раза приводит к снижению давления на 17...20 %. Конечные значения повреждаемости материала в вершине купола: 0,35 за 10 мин и 0,3 за 15 мин. Таким образом, увеличение длительности операции обеспечивает снижение давления и роста повреждаемости.

Относительная толщина стенки в вершине купола оболочки при формовке из плоской заготовки составила δ_0/δ_k = 2,5. При формовке из конической заготовки расчетная величина δ_0/δ_k = 1,5. Длительность процесса мало влияет на конечную толщину изделия в вершине купола. Для предупреждения искажения геометрии изделия охлаждение оболочки после формообразования осуществляли в оснастке под давлением газа. Давление снимали по мере остывания. Оболочки, полученные газоформовкой из конических заготовок, показаны на рис. 3.

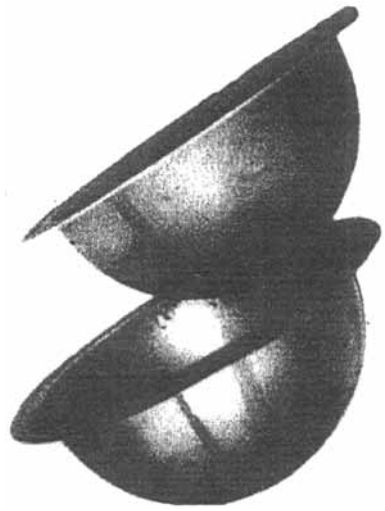


Рис. 3. Образцы полусферических оболочек

Выводы

1. Формообразование сферической оболочки из вытянутой предварительно конической заготовки обеспечивает снижение повреждаемости материала и неравномерности толщины стенки изделия.

2. Силовые режимы операции определяются временем (длительностью) процесса. Повреждаемость материала заготовок зависит от времени и степени формообразования для одних материалов; для других — только от степени формообразования. Этот фактор влияет на качество изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Изотермическая** пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.С. Яковлев и др. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
2. **Ларин С.Н., Чудин В.Н.** Технологические процессы изотермического формообразования полусферических деталей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 11. С. 20—25.
3. **Чудин В.Н.** Вытяжка с нагревом конической заготовки для газоформовки оболочки // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 3. С. 113—115.
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

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

УДК 621.983

С.С. Яковлев (мл.), В.А. Коротков
(Тульский государственный университет)

Способ получения рифлей на внешней поверхности цилиндрических заготовок*

Предложена методика нанесения на внешнюю поверхность цилиндрической оболочки рифлей с использованием матриц с наклоненными выступами по периметру рабочего пояска, имеющими клиновую форму. Проведено компьютерное моделирование процесса с использованием программного комплекса QForm.

Ключевые слова: вытяжка с локальным утонением; компьютерное моделирование; клиновые выступы; рифля; внешняя поверхность цилиндрической оболочки.

Technique for application on outer surface of cylindrical shell of riffles using dies with inclined ledges along the perimeter of the die bearing, which have wedge shape is offered. Computer simulation of the process using the QForm software is made.

Keywords: local thinning drawing; computer simulation; wedge ledges; riffle; outer surface of cylindrical shell.

В современной промышленности основным способом получения рифли на внешней поверхности трубной заготовки или заготовки типа "стакан" является накатывание рифлений [1]. Однако данный способ имеет ряд недостатков, в числе которых низкая производительность процесса и ограниченность глубины рифлей. Поэтому актуальна разработка технологий, лишенных указанных недостатков.

Одним из способов является вытяжка с локальным утонением через матрицы с наклоненными выступами по периметру рабочего пояска, имеющими клиновую форму выступов с наклоном от 20 до 45° (рис. 1). Для получения внешней сетки рифлей необходимо осуществлять последовательно вытяжку через матрицу, например, с левым наклоном выступов от 20...45°, а затем через матрицу с правым наклоном выступов.

При вытяжке с локальным утонением через две матрицы (рис. 2) получается сетка рифлей по всей высоте поверхности детали за один рабочий ход пуансона.

Для оценки получаемой сетки рифлей на наружной поверхности детали после вытяжки с локальным утонением было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе QForm. В расчетах применяли матрицы, число клиновых выступов которых равно 16, высота выступов 2 мм; угол наклона выступов 30°; диаметр по впадинам 36 мм. Для обеспечения оптимальных условий вытяжки

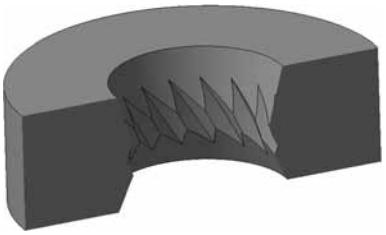


Рис. 1. Матрица с наклоненными выступами клиновой формы по периметру рабочего пояска

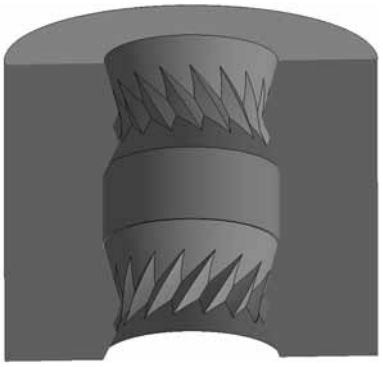


Рис. 2. Получение сетки рифлей на наружной поверхности детали вытяжкой с локальным утонением через две матрицы

* Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710014 и гранта администрации Тульской области.

заходный участок матрицы выполняли конусным под углом 15°. Диаметр цилиндрического пуансона 30 мм.

В качестве заготовки использовали стакан: толщина стенки 3 мм; внешний диаметр 36 мм; высота 20 мм; материал (изотропный) — сталь 10; предел прочности 372 МПа; предел текучести 205 МПа.

Результатом моделирования является последовательное получение рифленой поверхности детали, получаемой вытяжкой с локальным утонением через первую матрицу (рис. 3) с наклоненными выступами клиновой формы (под углом 30° вправо), расположенными по периметру рабочего пояска.

Рис. 3. Полуфабрикат детали с наклонными рифлями, полученной вытяжкой с локальным утонением через первую матрицу с наклоненными выступами клиновой формы под углом 30° по периметру рабочего пояска

Рис. 4. Деталь, полученная вытяжкой с утонением через матрицы с наклоненными выступами клиновой формы по периметру рабочего пояска

На рис. 4 показана деталь с сеткой рифлей после вытяжки с локальным утонением через вторую матрицу с наклоненными выступами клиновой формы (под углом 30° в противоположном направлении), расположенными по периметру рабочего пояска.

При получении наклонных канавок на внешней поверхности заготовки в процессе локального утонения стенки при вытяжке через первую матрицу происходит поворот (по часовой стрелке на угол 63°) заготовки относительно инструмента. Угол поворота зависит от угла наклона выступов матрицы и высоты заготовки.

При прохождении через вторую матрицу в процессе локального утонения стенки при вытяжке происходит поворот полуфабриката в противоположном направлении. Угол поворота составил 84° из-за увеличения высоты полуфабриката после первой вытяжки.

Для обеспечения получения требуемой рифленой наружной поверхности в полуфабрикате должно соблюдаться условие, при котором расстояние между рабочими поясками матриц больше высоты полуфабриката после вытяжки через первую матрицу. Это условие обеспечивает вращение полуфабриката.

На основании данных, полученных в результате моделирования, были определены силовые параметры процесса. Изменение силы вытяжки с локальным утонением в зависимости от перемещения пуансона через первую и вторую матрицы приведено на рис. 5.

Как видно из рис. 5, сила вытяжки с локальным утонением заготовки через первую матрицу примерно в 2 раза выше, чем при вытяжке через вторую матрицу. Это связано с тем, что площадь клиновых выступов [2], внедренных в материал заготовки при вытяжке через первую матрицу, примерно в 2 раза больше, чем площадь этих выступов, внедренных в полуфабрикат на второй вытяжке. Характер изменения силы на второй матрице имеет ярко выраженные колебания, связанные с тем, что выступ второй матрицы попадает в канавку, образованную первой матрицей.

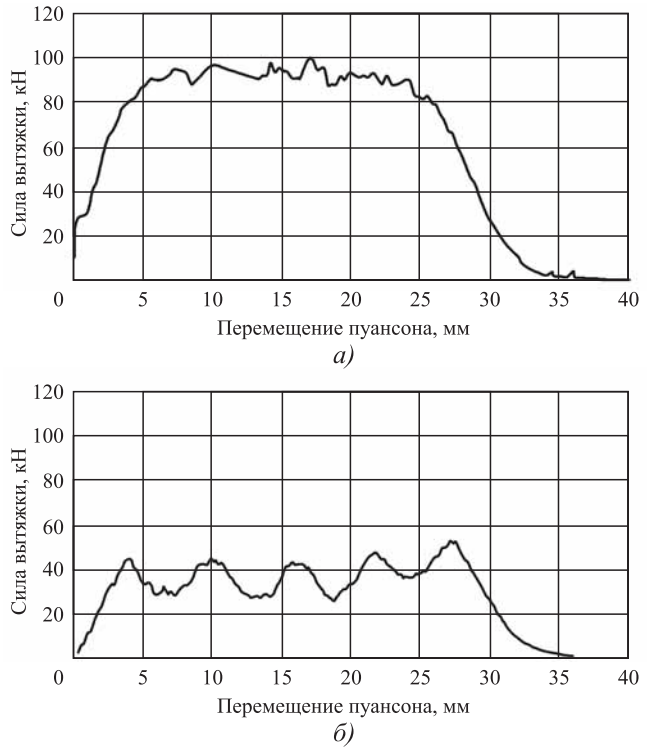


Рис. 5. Изменение силы вытяжки с локальным утонением на первой (*а*) и второй (*б*) матрице в зависимости от перемещения пуансона

Выводы

1. При вытяжке в матрице с наклонными выступами происходит не только осевое перемещение, но и вращение заготовки, вызванное появлением окружной составляющей силы.

2. С увеличением угла наклона повышается окружная составляющая силы, в результате чего возрастает результирующая сила (в осевом направлении).

3. При формоизменении на второй матрице сила формоизменения снижается и колеблется из-за уменьшения очага деформации и его периодического колебания, вызванного наличием на поверхности заготовки полученных в первой матрице канавок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

2. **Яковлев С.С.** Определение силовых параметров при вытяжке с утонением и интенсивной пластической деформацией // Известия Тульского государственного института. Технические науки. 2017. Вып. 11 (часть 1). С. 212—219.

Сергей Сергеевич Яковлев;
Виктор Анатолиевич Коротков, канд. техн. наук,
mpf-tula@rambler.ru

УДК 621.771.2

Е.А. Максимов, Е.П. Устиновский
(Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)

Исследование технологических параметров правки и мощности главного привода листовой правильной машины

Представлены методика расчета технологических параметров правки и методика расчета потребляемой мощности электродвигателя главного привода при правке толстых стальных листов на роликовой правильной машине (РПМ), позволяющие повысить точность расчетов мощности электродвигателя на 10...15 % при модернизации агрегатов правки. Приведена блок-схема алгоритма расчета параметров правки, мощности электродвигателя, а также изгибающих моментов для РПМ.

Ключевые слова: технологические параметры; правка толстых стальных листов; роликовая листовая правильная машина; расчет потребляемой мощности электродвигателя машины.

The design procedure of technological parameters and design procedure of input of the electric motor of the main drive are presented at straightening of thick steel sheets on the roller straightening machine which allow to raise accuracy of calculations of power of the electric motor on 10...15 % at modernisation of straightening assemblies.The circuit design of calculation algorithm of straightening parametres, power of the electric motor, and also bending moments for roller straightening machine is resulted.

Keywords: technological parameters; straightening of thick steel sheets; roller sheet straightening machine; calculation of input of electric motor machine.

В настоящее время для расчетов мощности электродвигателя главного привода при модернизации правильных агрегатов используют известные методики [1—8]. Анализ методов расчетов [1—8] показал, что при определении мощности электродвигателя главного привода роликовой правильной машины (РПМ) не учитывается мощность, расходуемая на разгон (торможение) деталей привода. Кроме того, мощность правки, затрачиваемую на изгиб листа, определяют без учета упрочнения листа при его выправлении роликами РПМ [9—15].

Цель работы — повышение точности расчетов технологичеких параметров правки листового проката на РПМ, а также уточнение методики расчета потребляемой мощности электродвигателя при модернизации агрегатов правки.

Для i-го ролика РПМ относительную деформацию листа при перегибе под роликами РПМ [2] запишем в виде

$$\Delta_i = \Delta_2\left(1 - \frac{i-2}{n-3}\right), \qquad (1)$$

где Δ_2 — перегиб листа под вторым роликом РПМ;

n — число роликов в РПМ.

Суммарная относительная деформация листа для всех роликов РПМ:

$$\Delta_{\text{с}} = \sum_{2}^{n-1} \Delta_i. \qquad (2)$$

Пластический изгибающий момент для всех роликов РПМ [2, 5, 6] вычислим по формуле

$$M_{\text{п}} = \frac{\sigma_s^2 B h D_{\text{р}}}{4E}\Delta_{\text{с}}, \qquad (3)$$

где $D_{\text{р}}$ — диаметр бочек рабочих роликов;

B, h — ширина и толщина листа соответственно;

σ_s, E — предел текучести и модуль упругости материала листа соответственно.

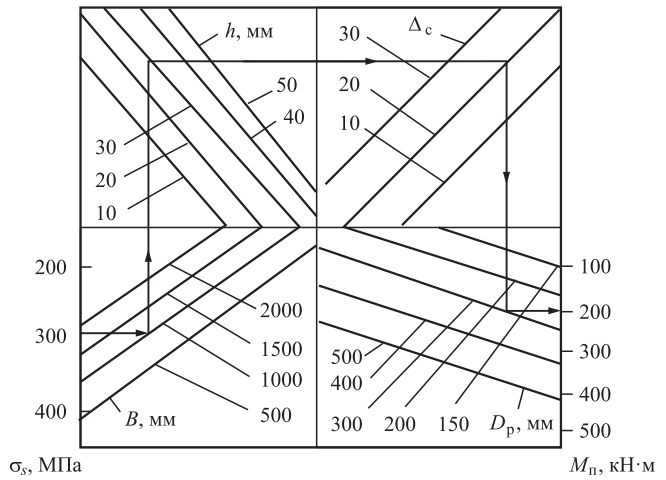


Рис. 1. Номограмма расчета изгибающих моментов для РПМ

Адекватность модели проверяли сравнением результатов расчета с данными промышленных экспериментов [5], разброс при этом не превышал 15 %.

Номограмма расчета изгибающих моментов для РПМ представлена на рис. 1. Например, для σ_s = 300 МПа, B = 1500 мм, h = 30 мм, Δ_c = 20, $D_р$ = 300 мм изгибающий момент $M_п$ = 200 кН·м.

При реверсивной работе РПМ потребляемую мощность электродвигателя [2, 6, 9] определим по формуле

$$N_{дв} = N_п + N_{т.к} + N_{ш.о} + N_{дин}, \quad (4)$$

где $N_п$ — мощность правки, затрачиваемая на изгиб листа;

$N_{т.к}$ — мощность, затрачиваемая на трение качения роликов по листу;

$N_{ш.о}$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на шейках опорных роликов;

$N_{дин}$ — мощность, расходуемая на разгон (торможение) деталей привода.

Мощность правки, затрачиваемая на изгиб листа между роликами РПМ [2, 6, 9]:

$$N_п = \frac{1}{\eta}\sum_{2}^{n-1} M_п \frac{v}{D_р}, \quad (5)$$

где η — КПД; v — скорость правки.

Для расчета мощности правки необходимо знать суммарный изгибающий момент $M_п$ для всех роликов РПМ.

Мощность, соответствующая трению качения роликов по листу [2, 6, 9]:

$$N_{т.к} = P_{\Sigma} f_{т.к}\left(\frac{2v}{D_p}\right), \quad (6)$$

где $f_{т.к}$ — коэффициент трения качения в подшипниках роликов;

P — сила правки.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на шейках опорных роликов диаметром $D_о$ [2, 6, 9]:

$$N_{ш.о} = f_о \varphi P \frac{d_о}{2}\frac{2v}{D_о}, \quad (7)$$

где $f_о$ — коэффициент трения в подшипниках опорных роликов;

$d_о$ — диаметр цапф опорных роликов;

φ — коэффициент, показывающий, какую часть суммарной силы правки воспринимают опорные ролики, φ = 0,8.

Схема главного привода семироликовой РПМ приведена на рис. 2.

Мощность, расходуемая на разгон (торможение) деталей главного привода РПМ [2]:

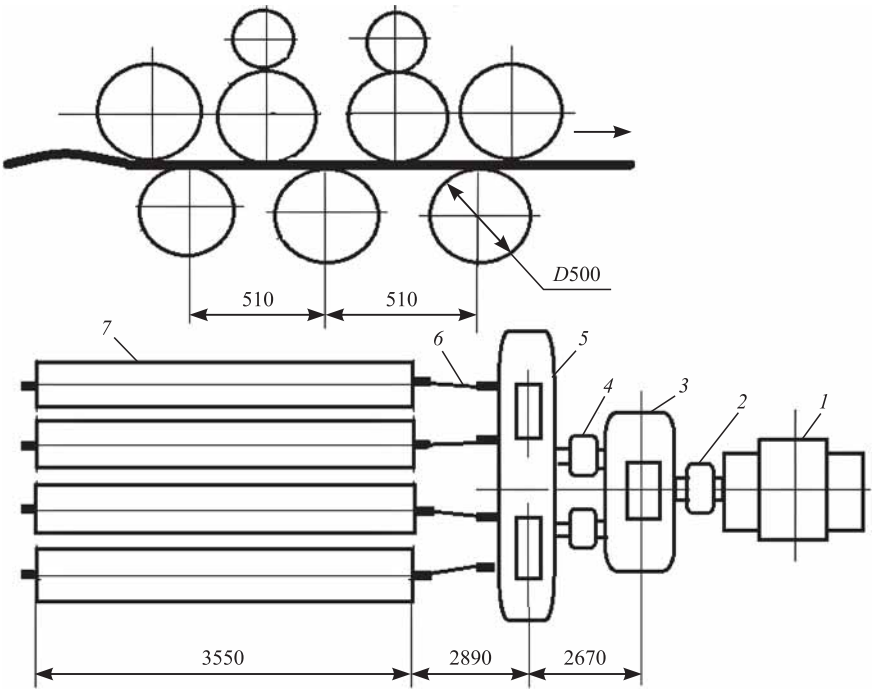


Рис. 2. Схема главного привода семироликовой РПМ:

1 — электродвигатель; *2, 4* —муфта; *3* — редуктор; *5* — шестеренная клеть; *6* — универсальные шпиндели; *7* — рабочие ролики

Результаты расчета потребляемой мощности электродвигателя для различных РПМ

Параметр	Завод				
	Ашинский МЗ	Чусовской МЗ	Кузнецкий МК	Красный Октябрь	Уральская сталь
Число роликов в РПМ	7	9	11	13	17
h, мм	6...30	До 20	До 20	5...25	5...20
B, мм	До 2650	1200...1800	До 1800	До 1800	1250...2200
$D_р$, мм	360	170	170	150	320
$N_п$, кВт	108	149	156	168	179
$N_{т.к}$, кВт	73	80	100	120	190
$N_{ш.о}$, кВт	19	21	25	28	35
$N_{дв}$, кВт	200	250	281	316	404

$$N_{дин} = M_{дин}\omega, \quad (8)$$

где ω — частота вращения электродвигателя.

Динамический момент определим по формуле [2]

$$M_{дин} = \sum \frac{mD_i^2}{4}\frac{d\omega}{dt}, \quad (9)$$

где $mD_i^2/4$ — маховый момент, приведенный к валу электродвигателя;

$\frac{d\omega}{dt}$ — угловое ускорение.

Для двухступенчатого редуктора приведенный к валу двигателя динамический момент:

$$M_{дин} = \frac{1}{4}\left(mD_я^2 + mD_м^2\right) + \frac{mD_{р2}^2}{i_{р1}^2} + \left(mD_{р3}^2 + mD_ш^2 + mD_{шп}^2 + mD_р^2\right)/i_р^2, \quad (10)$$

где $mD_я^2$ — маховый момент якоря электродвигателя;

$mD_м^2$ — маховый момент муфты и первого вала редуктора;

$mD_{р2}^2$, $mD_{р3}^2$ — маховый момент второго и третьего вала редуктора;

$mD_ш^2$ — маховый момент шестеренной клети;

$mD_{шп}^2$ — маховый момент шпинделей;

$mD_р^2$ — маховый момент рабочих роликов;

$i_р$ — передаточное число для всего редуктора;

$i_{р1}$ — передаточное число для первой ступени редуктора.

Для электродвигателя П112 при частоте вращения 1500 об/мин маховый момент составляет $\frac{1}{4}mD_я^2 = 225{,}6$ Н·м^2, для муфты упругопальцевой МУВП — $\frac{1}{4}mD_м^2 =$ 36 Н·м^2, для двухступенчатого редуктора Ц2-750 момент $mD_{р3}^2$ = 23 кН·м, для главного привода РПМ динамический момент $M_{дин}$ = = 350 Н·м, мощность $N_{дин}$ = 50 кВт.

Результаты расчета потребляемой мощности электродвигателя для различных РПМ представлены в таблице.

Для 7-, 9-, 11-, 13- и 17-роликовых правильных машин потребляемая мощность электродвигателя главного привода составляет 200, 250, 281, 316 и 404 кВт соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Степанов П.П.** Современные технологии антикоррозинноых покрытий металлопроката, трубопроводов и профилей. Челябинск: ЮУРГУ, 2015. 333 с.

2. **Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Литвинова Н.Н.** Исследование усилия протягивания оцинкованных полос на правильной машине агрегата непрерывного горячего цинкования // Металлург. 2014. № 5. С. 79—82.

3. **Максимов Е.А., Шаталов Р.Л.** О настройке натяжных многороликовых устройств при обработке полосового проката (сообщение 1) // Сталь. 2014. № 1. С. 49—51.

4. **Максимов Е.А., Шаталов Р.Л.** О настройке натяжных многороликовых устройств при обработке

полосового проката (сообщение 2) // Сталь. 2014. № 5. С. 53—57.

5. **Недорезов И.В.** Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. Екатеринбург: Аква-Пресс, 2003. 256 с.

6. **Слоним А.З.** Машины для правка листового и сортового проката. М.: Металлургия, 1987. 132 с.

7. **Хольцмюллер Г.** Комплексное определение параметров толстого листа // Черные металлы. 2007. № 6. С. 58—62.

8. **Королев А.А.** Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. М.: Металлургия, 1983. 371 с.

9. **Enike F.** Superplastics and forming // The minerals, metals and materials society. 1995. No. 2. P. 213—217.

10. **Lukas P.** The area of a corrected assortment of sheets and strips // Acta Materialia. 2001. No. 5. P. 899—910.

11. **Nobuhisa S.** Systematic integrity of high-streng pipelines // JFE Technical Report. 2008. No. 9. P. 218—220.

12. **Prinsky D.** Straightening installation for sheet // MPT Int. 2010. No. 3. P. 58—59.

13. **Deli H.** Increase of wood work roll life time by innovate coolant and lubricant application // Metec in Steel Con. Proceedings 3rd internationales steel conference, Dusseldorf. 2000. P. 441—442.

14. **Jelale M.** New flatness control system at the tandem cold mill // Proc. of ATS, Paris. 2006. No. 9. P. 203—205.

15. **Polzer J.** Advanced control system for a form-fit-bending unit // Proc. of 28 journess Sidererurgigues internationales ATS, Paris. 2007. No. 4. P. 199—202.

Евгений Александрович Максимов, канд. техн. наук,
maksimov50@mail.ru;
Евгений Петрович Устиновский, канд. техн. наук

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

СПРАВОЧНИК
Технолога-Машиностроителя
в 2-х томах
Под ред. ***А.С. Васильева, А.А. Кутина***
Издание 6-е, переработанное и дополненное. 2018 г. 1574 с.
В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.

Цена 15 000 руб.

Том 1. Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.

Том 2. Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизико-химическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ
по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.9.016, 621.9.015

А.Н. Абрамов, А.В. Боткин, Э.Г. Балышева
(Уфимский государственный авиационный технический университет)

Влияние физико-химических свойств смазочного материала на шероховатость поверхности деформируемой заготовки при волочении*

Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию различных смазочных материалов на шероховатость поверхности заготовок из сплава АД31 при волочении через роликовую волоку.

Ключевые слова: шероховатость поверхности; смазочный материал; волочение; сила трения; профилометр.

The results of experimental studies on the effect of different lubricants on surface roughness of workpieces from alloy AD31 at drawing through rolling die are presented.

Keywords: surface roughnes; lubricant; drawing; friction; profilometer.

Введение. Известно множество методик по оценке заедания трущихся контактов и задирообразования. При обработке металлов давлением картина влияния смазочного слоя на процесс трения значительно усложняется, так как пластическое сдвигообразование, обусловленное трением, в системах на границе обрабатываемый металл—инструмент происходит при непосредственном влиянии больших механических напряжений и деформации обрабатываемого материала.

Шероховатость поверхности в процессе обработки металлов давлением зависит от следующих факторов: метода обработки, режима обработки, геометрических параметров и качества деформирующего инструмента, пластической и упругой деформации материала заготовки или детали, физико-химических свойств смазочного материала и т.д.

Взаимодействие поверхности инструмента с пластическим деформируемым материалом с заданной шероховатостью рассмотрено в работах [1—5].

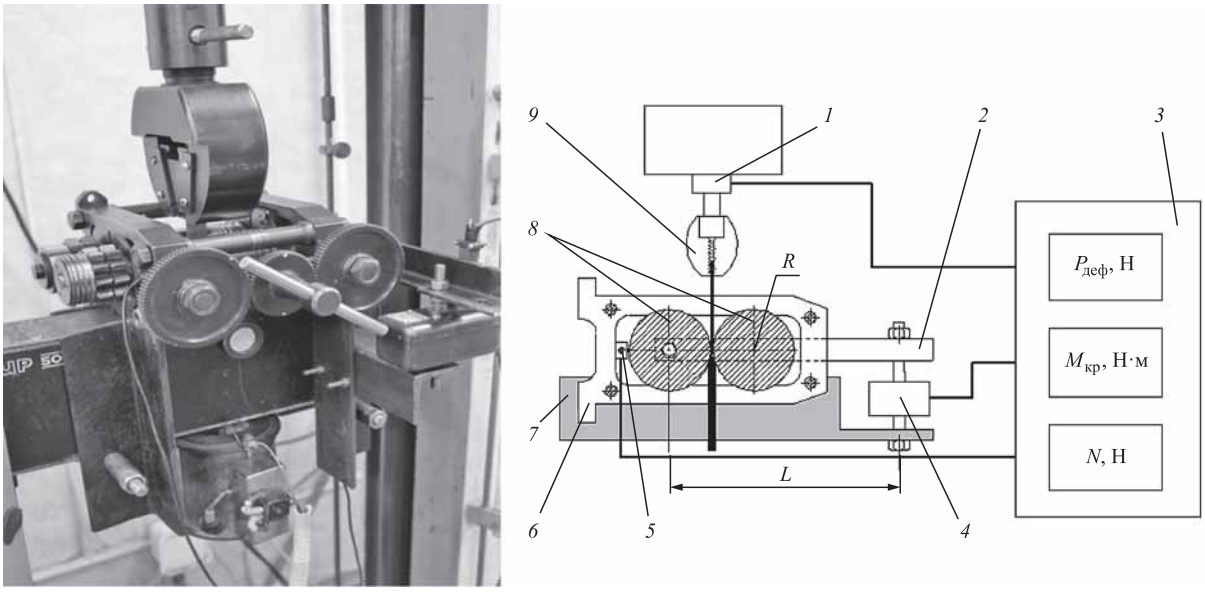
В работах [6, 7] было установлено, что при деформировании образцов из сплава АД31 без применения смазочного материала, начало образования задира соответствует логарифмической степени деформации по толщине заготовки 0,02, для индустриального масла И-12А — 0,05, для индустриального масла И-12А с поверхностно-активными присадками — 0,1. При использовании смазочной композиции с дисульфидом молибдена, графитом и присадкой, содержащей серу, за счет полного экранирования поверхности заготовки и инструмента дефекты на поверхности заготовок отсутствовали до исчерпания ресурса пластичности, т.е. до разрушения образцов при логарифмической степени деформации 0,51.

В такой схеме деформирования экранирующая работоспособность масла И-12А ограничивается контактными давлениями 20...30 МПа, смазочного материала с поверхностно-активными присадками — 60...70 МПа, а смазочной композиции с добавками дисульфида молибдена, серы и графита — 210...220 МПа при скорости деформирования $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ м/с [6, 7].

Цель работы — оценка шероховатости поверхности при волочении через роликовую волоку заготовок из сплава АД31 в зависимости от физико-химических свойств смазочного материала и действия силы трения скольжения.

Методика исследований. Заготовки из сплава АД31 в виде прутков шириной 30 мм, толщиной 3 мм и длиной 350 мм протягивали через валки диаметром 47 мм из стали ХВГ твердостью 55...60 HRC и параметром шероховатости поверхности Ra = 0,09 мкм. Исходный параметр шероховатости образцов составлял Ra = 0,53 мкм.

* Работа выполнена в рамках проекта № 17-48-020688 р_а при поддержке РФФИ и Академии наук Республики Башкортостан.



а) *б)*

Рис. 1. Экспериментальный стенд (*а*) и схема деформирования (*б*):

1 — датчик силы разрывной машины; *2* — рычаг механизма торможения; *3* — блок регистрации данных с датчиков силы; *4* — датчик силы, фиксирующий момент силы трения на роликах; *5* — датчики силы, регистрирующие нормальную силу на валки; *6* — станина с подшипниками и механической системой регулировки зазора между роликами и зубчатой передачей; *7* — подвижная траверса разрывной машины; *8* — ролики; *9* — захват разрывной машины

Все образцы из сплава АД31 деформировали с одним заданным обжатием на всю длину (логарифмическая степень деформации по толщине заготовки составляла 0,05, скорость деформирования $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ м/с). Схема деформирования показана на рис. 1.

Параметр шероховатости поверхности деформированных образцов определяли с помощью профилометра TR-220 (компания Time Group, Китай) (рис. 2), позволяющего делать расчеты шероховатости, результаты выводятся на графический ЖК-экран. Параметры профилометра TR-220 соответствуют ТУ GB/T 3505—2000.

В качестве смазочных материалов использовали: масло индустриальное И-40А без присадок, масло индустриальное И-40А с 8 % поверхностно-активного вещества (ПАВ) и масло индустриальное И-40А с 8 % полимерного наполнителя.

Шероховатость поверхности заготовок оценивали при двух различных вариантах деформирования:

— при застопоренных роликах;

— при свободно вращающихся роликах.

При свободно вращающихся роликах принимали, что относительного скольжения контактной поверхности деформируемой заготовки по инструменту (роликам) не происходит, следовательно, и трение скольжения отсут-

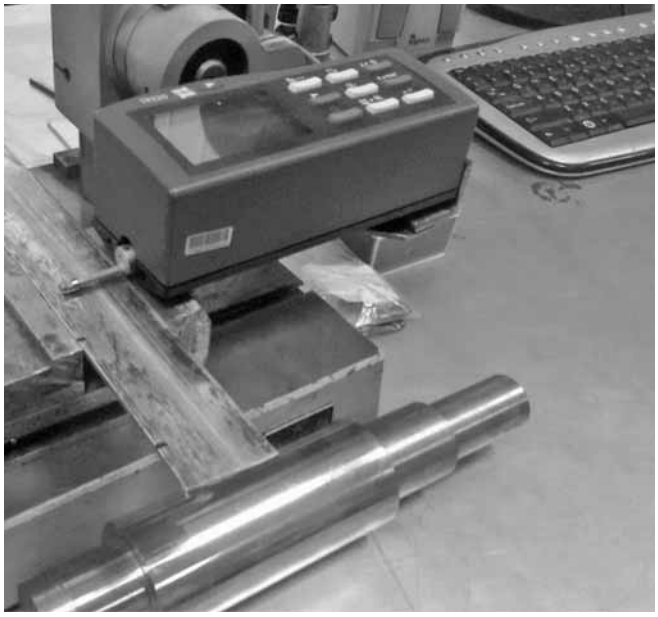


Рис. 2. Профилометр TR-220, полоса из сплава АД31 и ролик (валок)

ствует, а сила, с которой осуществляется деформирование заготовки, расходуется только для деформирования металла. При застопоренных роликах общая сила деформирования увеличивается, так как появляется сила трения скольжения [6].

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 3 показаны характерные профилограммы (по пяти испытаниям) поверхности заготовок из сплава АД31 после волочения через роликовую волоку с различными вариантами деформирования и смазочными материалами.

При свободно вращающихся роликах (трение скольжения отсутствует) параметр шероховатости поверхности уменьшается по отношению к исходному параметру шероховатости

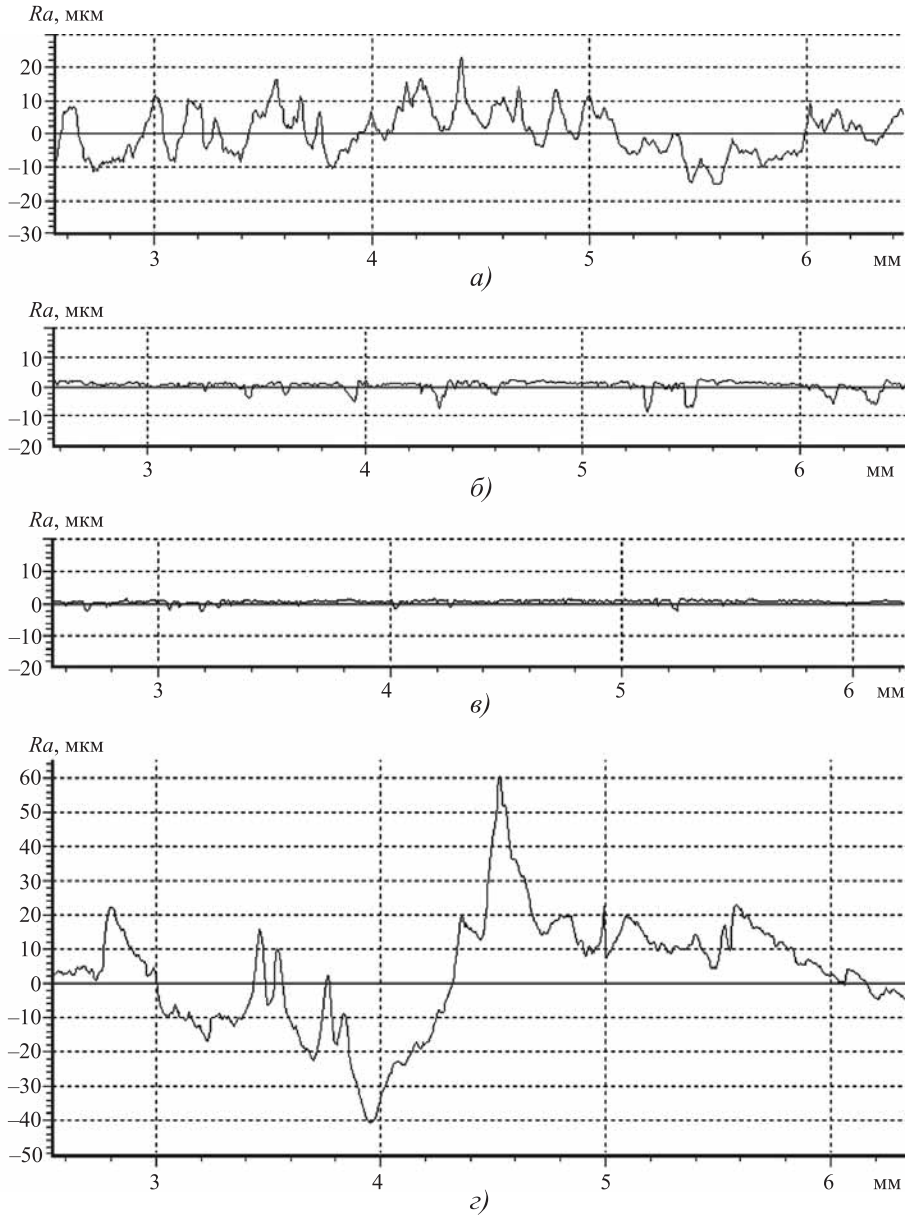


Рис. 3. Профилограммы поверхности заготовок из сплава АД31 после волочения через роликовую волоку с различными вариантами деформирования и смазочными материалами:

а — *Ra* = 1,6 мкм, ролики застопорены, масло И-40А с ПАВ; *б* — *Ra* = 0,7 мкм, ролики застопорены, масло И-40А с полимерным наполнителем; *в* — свободно вращающиеся ролики, без смазочного материала и с использованием масла И-40А с ПАВ; *г* — *Ra* = 12,5 мкм, ролики застопорены, масло И-40А без присадок (задир)

заготовки (см. рис. 3, *в*). Аналогичный результат по значению параметра шероховатости при свободно вращающихся роликах был получен также и при использовании масла И-40А с ПАВ.

Разница между максимальным и минимальным значениями *Ra* без учета зоны с задирами составляет 0,8...1 мкм. Как видно из рис. 3, *в*, при свободно вращающихся роликах, т.е. когда сила трения скольжения отсутствует (даже без применения смазочного материала), параметр шероховатости поверхности значительно ниже, чем при действии силы трения скольжения при застопоренных роликах.

По мнению авторов статьи, присутствие полимерного наполнителя в смазочном материале не только не ухудшает качество поверхности заготовки, но и значительно уменьшает зоны с адгезионным взаимодействием, т.е. механизм их действия в общем случае сводится к разделительному эффекту, или к образованию буферного слоя между поверхностями заготовки и инструмента. Следствием создания такого слоя является значительное уменьшение адгезионной составляющей силы трения и точек взаимодействия микронеровностей поверхностей инструмента и заготовки, потому что наполнитель, попадая в шероховатости поверхности заготовки и инструмента способствует увеличению фактической площади контакта. Таким образом, уменьшается давление на пики шероховатостей, что, очевидно, приводит к снижению деформации последних, которая определяет адгезионное взаимодействие заготовки с инструментом.

Результаты исследований наглядно демонстрируют зависимость качества поверхности заготовки от физико-химических свойств применяемого смазочного материала и способа приложения сил.

Исследования шероховатости поверхности показали, что за счет применения различных смазочных материалов можно повысить качество поверхности на два класса по ГОСТ 2789—73.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Xuesheng C., Qin Y., Balendra R.** Development of a statistical parameter-based surface model for the simulation of variation of surface roughness with contact pressur // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 145. P. 247—255.
2. **Sachtleber M., Raabe D., Weiland H.** Surface roughening and color changes of coated aluminum sheets during plastic straining // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 148. P. 68—76.
3. **Повышение** эффективности методов комбинированного волочения за счет регуляризации микрогеометрии рабочей поверхности инструмента / А.В. Щедрин, В.М. Скоромнов, А.А. Бекаев, Н.Ю. Чихачева // Машиностроитель. 2007. № 7. С. 26—29.
4. **Платов С.И., Терентьев Д.В.** Волочение катанки и проволоки с регламентируемым микрорельефом поверхности // Производство проката. 2002. № 4. С. 27—28.
5. **Вирт А.Э.** Влияние усилия деформирования при ППД на шероховатость обработанной поверхности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 12-1. С. 12—14.
6. **Абрамов А.Н., Тюленев Д.Г., Филиппова Н.А.** Экспериментальная методика оценки сил деформирования, трения и нормального напряжения при волочении заготовок через роликовую волоку // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 5. С. 13—17.
7. **Шолом В.Ю., Жернаков В.С., Абрамов А.Н.** Методология исследований триботехнических характеристик и выбора смазочных материалов для процессов холодной обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2016. № 4. С. 10—15.

Алексей Николаевич Абрамов, д-р техн. наук,
abramov-dom@yandex.ru;
Александр Васильевич Боткин, д-р техн. наук,
Элина Генриховна Балышева

УДК 669.018.44

Т.Г. Севальнёва[1], Г.С. Севальнёв[2], Ю.А. Курганова[1]
([1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
[2] ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов")

Исследование эволюции микроструктуры гранулируемого никелевого сплава системы Ni—Cr—Mo—Al—Co в процессе горячего изостатического прессования и последующей термической обработки

Представлена эволюция микроструктуры никелевого сплава системы Ni—Cr—Mo—Al—Co при горячем изостатическом прессовании (ГИП) и последующей термической обработке. Рассмотрено влияние режимов ГИП на структуру получаемой заготовки. Установлено, что при проведении ГИП при температуре ниже температуры полного растворения γ′-фазы формируется заготовка с наследованными границами от гранул. Показано изменение формы упрочняющей фазы при термической обработке, проанализирован химический состав.

Ключевые слова: гранульная металлургия; горячее изостатическое прессование; жаропрочный никелевый сплав; старение.

The evolution of the microstructure of Ni—Cr—Mo—Al—Co nickel alloy under hot isostatic pressing (HIP) and subsequent heat treatment is presented. The influence of HIP modes on the structure of the resulting billet is considered. It is established that when the HIP is carried out at temperature below the temperature of complete dissolution of the γ′-phase, a billet is formed with inherited boundaries from the granules. The change in the shape of the strengthening phase during the heat treatment is shown, the chemical composition is analyzed.

Keywords: granular metallurgy; hot isostatic pressing; high-temperature nickel alloy; aging

Введение. Удовлетворение постоянно увеличивающихся требований к прочностным характеристикам деталей, работающих в условиях высокотемпературного нагружения, износа и воздействия агрессивной среды является одной из главных задач при создании новых жаропрочных никелевых сплавов для производства деталей перспективных изделий в авиа- и ракетостроении [1—3].

Эффективный метод повышения прочностных свойств жаропрочных материалов — насыщение расплава тугоплавкими элементами. Однако усложнение легирования сплавов традиционно сопровождается снижением пластичности и сужением оптимального температурного интервала деформируемости. Указанные факторы являются причиной снижения коэффициента использования дорогостоящего материала и повышения трудоемкости производства.

Для решения этой проблемы применяют технологии гранульной металлургии. Гранулирование осуществляется распылением электрода из жаропрочного сплава с последующей быстрой кристаллизацией со скоростью более $10^3...10^4$ К/с, что позволяет получить мелкозернистую структуру с равномерно распределенными по объему материала легирующими элементами [4]. Например, в ОАО "Композит" Федерального космического агентства для получения таких гранул используют метод центробежного распыления быстровращающегося электрода на установке УЦР-4.

При использовании данного метода распыления происходит формирование сферических гранул размером 40...250 мкм. Для получения желаемого размера формируемых гранул подбор технологических параметров осуществляют согласно формуле [4]

$$d = \left(\frac{K_ч}{\omega}\right)\sqrt{\sigma_ж/(D_с\gamma_ж)}, \quad (1)$$

где $K_ч$ — коэффициент, оценивающий условия формирования частицы-капли в момент ее отделения от расплава; ω, $D_с$ — угловая скорость вращения и диаметр расходуемого электрода; $\sigma_ж$ — коэффициент поверхностно натяжения расплава; $\gamma_ж$ — плотность расплава.

На формирование механических свойств и структуры заготовки после прессования влияют характеристики гранул (химический состав, структура и размер), а также параметры технологических процессов *горячего изостатического прессования* (ГИП) и последующей термической обработки.

Цель работы — анализ влияния режимов ГИП и последующей термической обработки на эволюцию микроструктуры перспективного гранулированного никелевого сплава системы Ni—Cr—Mo—Al—Co.

Материал и методика исследований. В качестве объекта для исследований был выбран жаропрочный свариваемый никелевый сплав системы Ni—Cr—Mo—Al—Co, химический состав которого представлен в табл. 1.

Металлографические исследования структуры исследуемого сплава после ГИП проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях 100, 200 и 500. Микрошлифы изготовляли по стандартной методике и травили реактивом "Марбле".

Для изучения поверхности гранул, а также для анализа формирования структуры после горячего изостатического прессования использовали настольный сканирующий электронный микроскоп Phenom G2 Pro с ускоряющим напряжением 5 кВ и возможностью получения изображения в обратно отраженных электронах при увеличении до 40 000.

Для анализа формирования структуры при термической обработке применяли электронный микроскоп Hitachi SU8010 в режиме вторичных электронов при рабочих увеличениях 2000...50 000 и ускоряющем напряжении 15 кВ. Обработку изображений для количественного подсчета структурных составляющих проводили на программном обеспечении кафедры "Материаловедение" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Химический состав основной упрочняющей фазы определяли фазовым анализом на дифрактометре "Emperyan" с вертикально расположенным гониометром высокого разрешения модульной конструкции. Регистрация дифрактограмм выполнена на рентгеновском дифрактометре в монохроматическом кобальтовом K_α-излучении в геометрии Брегга—Брентано. Расшифровка дифрактограмм проведена с помощью специализированной программы и базы данных PDF2.

Результаты исследований и их обсуждение. Охлаждение капли осуществляется в среде аргона и гелия и происходит со скоростью $\approx 10^4$ К/с. В получаемой грануле видимых дефектов нет (рис. 1).

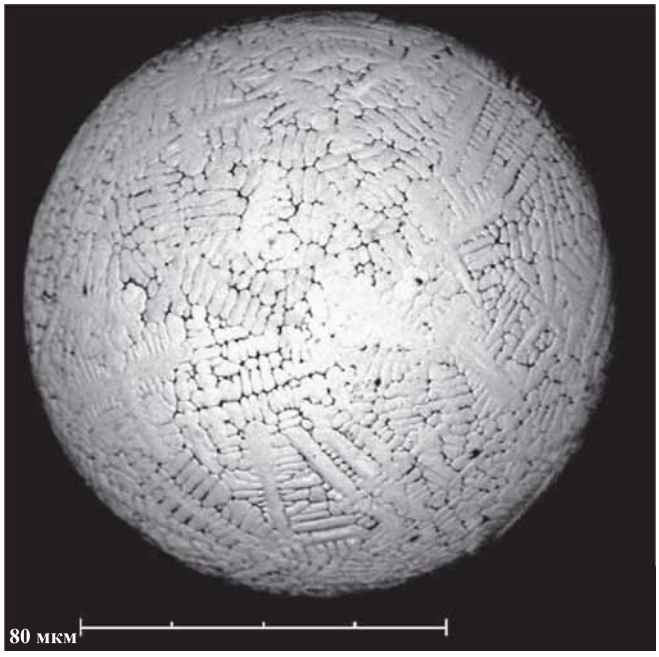


Рис. 1. Структура поверхности гранулы, полученная в обратно отраженных электронах

1. Химический состав исследуемого никелевого сплава [5], % мас.

Ni	Cr	Mo	Al	Co	Nb	Hf	C
59,9...66,2	15,0...16,00	7,5...8,5	4,0...5,0	5,0...7,0	2,0...3,1	0,3...0,5	0,008...0,01

В рассматриваемом случае матрица представляет собой твердый раствор легирующих элементов в никеле и имеет дендритное строение. Гранулы имеют тонкую дендритную структуру, характерную для высоких скоростей охлаждения.

Для получения из гранул деталей с высокими механическими свойствами важно сохранить однородность распределения химического состава в получаемых гранулах при последующем воздействии на них. Условие успешно реализуется при проведении ГИП [6—8].

При ГИП гранулы подвергаются газостатическому уплотнению под действием высоких температур от 1100 до 1220 °С и давления до 200 МПа. Происходят деформация и диффузионное взаимодействие, в результате которых осуществляются срастание гранул и последующая рекристаллизация [9, 10].

Для выявления режимов, обеспечивающих получение беспористой заготовки для исследуемого сплава выбранной системы, в ОАО "Композит" проводили горячее изостатическое прессование по нескольким режимам (табл. 2).

На рис. 2 приведены микроструктуры экспериментальных образцов.

Структура образца, полученная по режиму № 1, характеризуется наследованной структурой, выраженной наличием неспеченных гранул по всему объему заготовки. Данный эффект наблюдается при незавершенности диффузионного срастания гранул в процессе кристаллизации при горячем изостатическом прессовании. Структуры, сформированные по режимам № 2, 3 и 4, имеют равномерно распределенные зерна без наследованной структуры.

2. Параметры режимов горячего изостатического прессования

Номер режима	Параметры режима ГИП
1	p = 200 МПа, T = 1140 °С, выдержка 3 ч
2	p = 200 МПа, T = 1180 °С, выдержка 3 ч
3	p = 200 МПа, T = 1190 °С, выдержка 3 ч
4	p = 200 МПа, T = 1180 °С, выдержка 2,5 ч

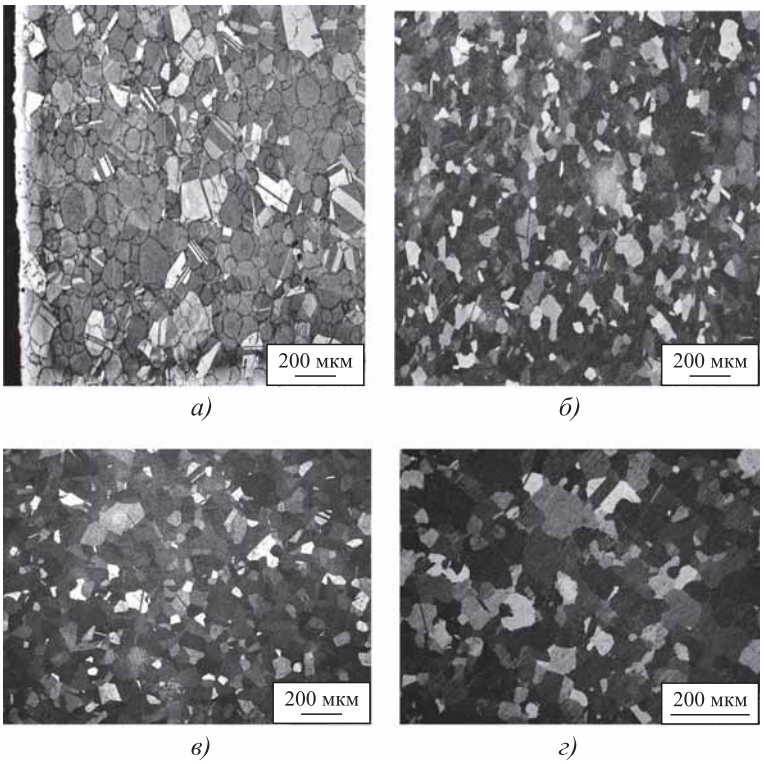


Рис. 2. Микроструктуры образцов из никелевого сплава, полученных после ГИП по режимам, представленным в табл. 2

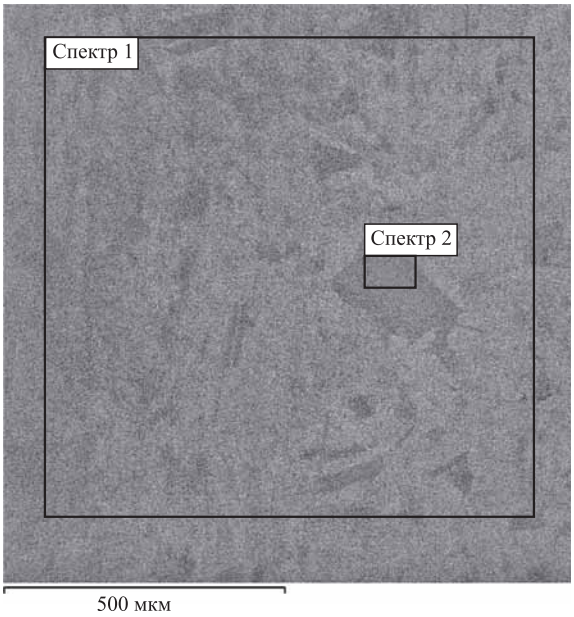
а — режим № 1; *б* — режим № 2; *в* — режим № 3; *г* — режим № 4

При дальнейшем повышении температуры технологического процесса ГИП наблюдаются резкое укрупнение зерна и частичное оплавление границ зерен.

Методом микрорентгеноспектрального анализа проанализирован химический состав полученной заготовки после ГИП по режиму № 4. Анализ проводили по двум спектрам в поле размером 1×1 мм. Полученное изображение и результаты химического анализа представлены на рис. 3 и в табл. 3. Разница в химическом составе не установлена.

3. Результаты расчетов размера γ′-фазы для режимов ГИП и термической обработки

Технологический процесс	Площадь, мкм^2	Периметр, мкм	Форм-фактор	Размер, мкм
ГИП:				
режим № 1	1,1	3,8	0,47	1,11
режим № 2	0,85	3,13	0,6	1,05
режим № 3	0,98	3,5	0,62	1,09
режим № 4	0,83	3,14	0,58	1,05
Закалка	0,01	0,38	0,89	0,15
Старение	0,02	0,45	0,87	0,18



Номер спектра	Al	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	Hf
1	3,98	16,14	6,21	62,25	2,23	8,77	0,41
2	4,06	16,26	6,22	61,77	2,30	8,90	0,48
Значение:							
среднее	4,02	16,20	6,22	62,01	2,26	8,84	0,45
максимальное	4,06	16,26	6,22	62,25	2,30	8,90	0,48
минимальное	3,98	16,14	6,21	61,77	2,23	8,77	0,41
Стандартное отклонение	0,06	0,09	0,01	0,34	0,05	0,09	0,05

Рис. 3. Микроструктура исследуемого сплава

Для анализа формирования γ′-фазы после ГИП образцы исследовали на сканирующем электронном микроскопе Phenom G2 Pro. Результаты представлены на рис. 4.

Структура, полученная по режиму № 1, содержит неравномерно распределенную γ′-фазу различных форм и размеров. Структуры, полученные по режимам № 2, 3 и 4, имеют

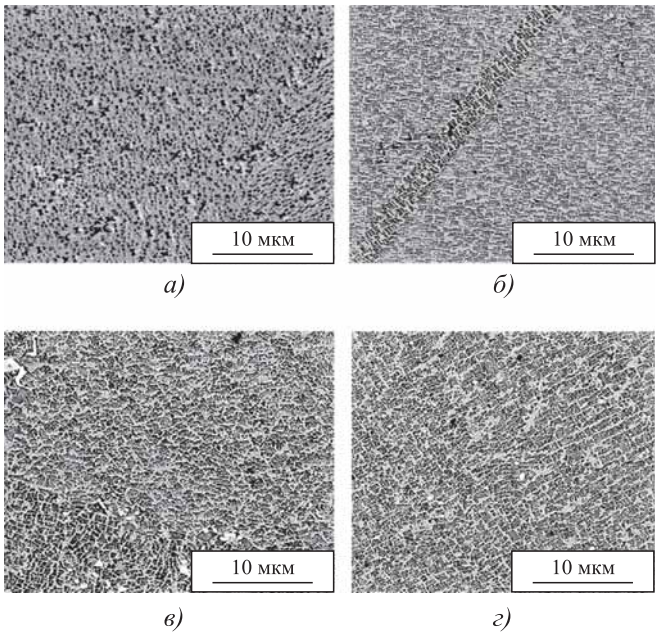


Рис. 4. Микроструктуры образцов из никелевого сплава, полученных после ГИП по различным режимам:
а — режим № 1; *б* — режим № 2; *в* — режим № 3; *г* — режим № 4

равномерно распределенную γ′-фазу по всему объему заготовки. Для количественного подсчета размеров получаемой γ′-фазы использовали программное обеспечение "КолОбок" кафедры "Материаловедение" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для более точного расчета изображение переводили в черно-белые тона с помощью инструмента бинаризации и проводили конечный расчет (рис. 5).

В данной программе рассчитывали размеры γ′-фазы для режимов ГИП № 1—4, а также для последующей термической обработки, осуществленной на образцах с наиболее рациональным режимом. Результаты средних

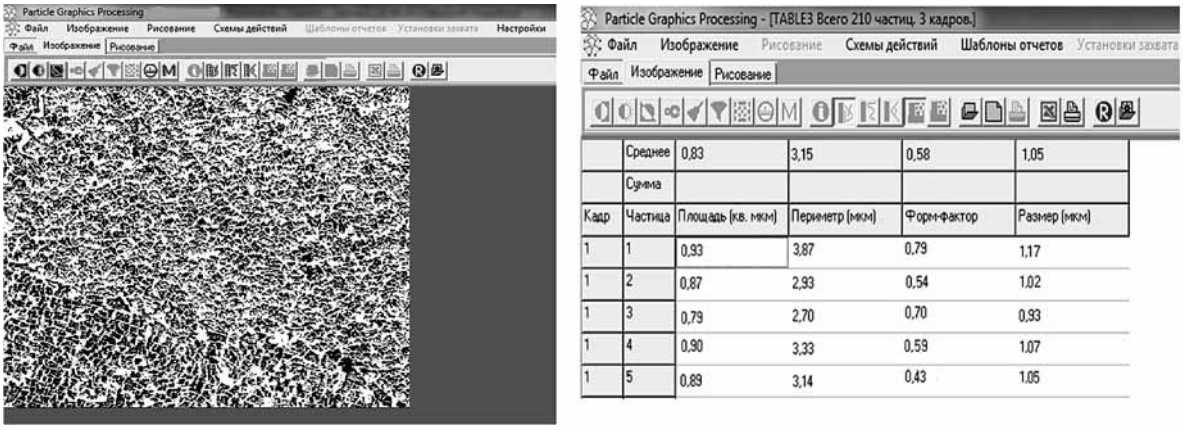
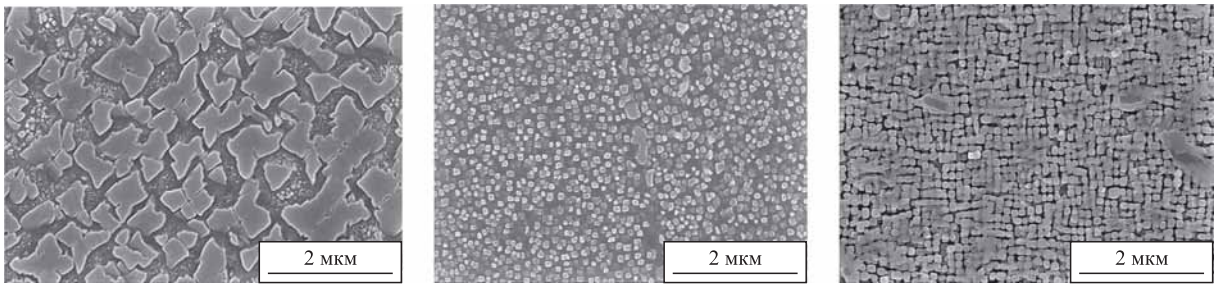


Рис. 5. Расчет упрочняющей γ′-фазы в программе "КолОбок"



а) *б)* *в)*

Рис. 6. Микроструктуры образцов из никелевого сплава, полученных после:
а — ГИП; *б* — закалки с температуры 1180 °С; *в* — старения при 820 °С

параметров расчетов представлены в табл. 3. По режиму № 1 температура процесса была ниже температуры полного растворения γ′-фазы и сформированная структура наследовала границы гранул из-за незавершенности процесса диффузионного срастания. Совокупность данных процессов повлияла на количество и форму γ′-фазы. По режимам № 2,

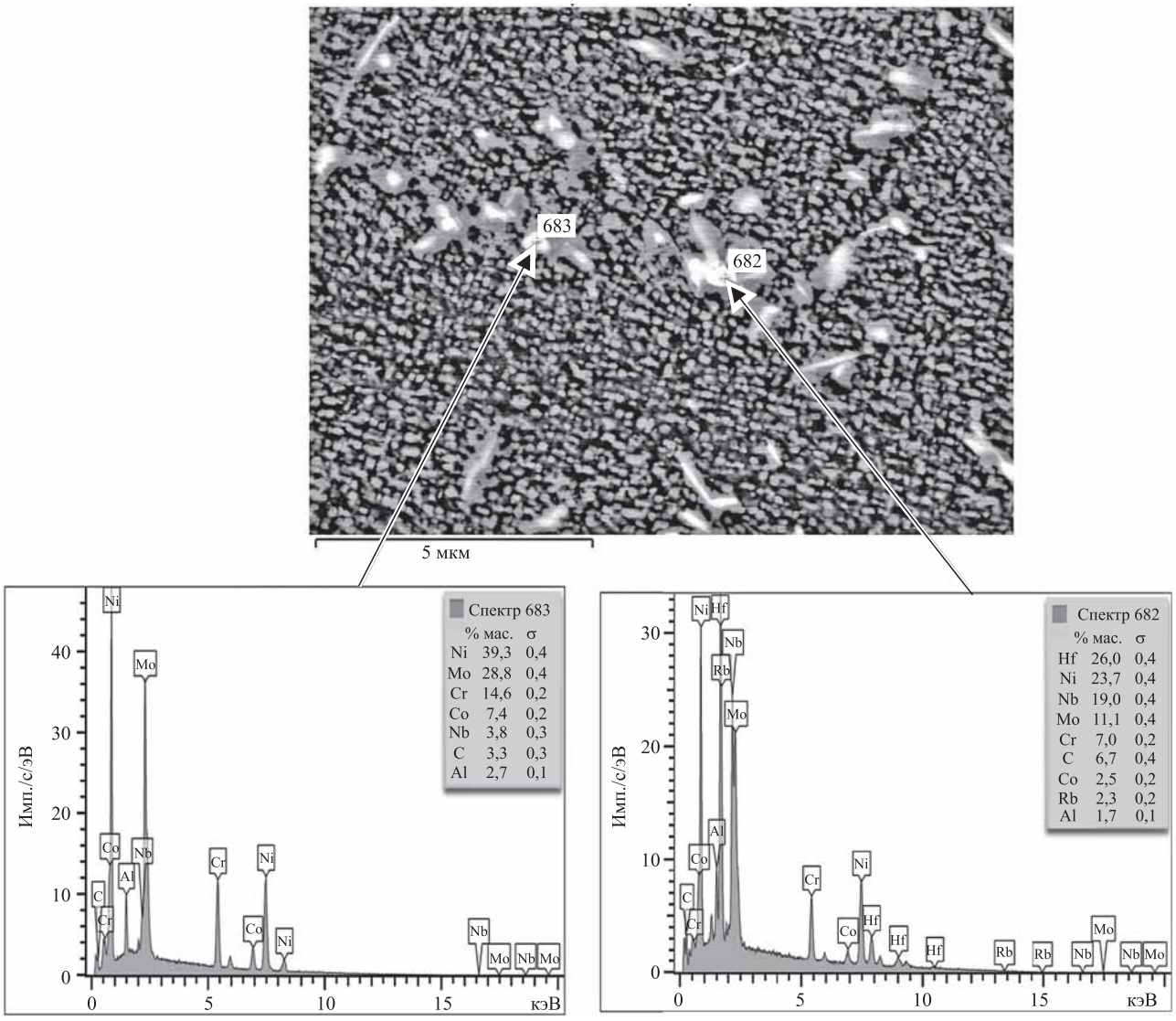


Рис. 7. Структура в обратно отраженных электронах и определение карбидной фазы с помощью микрорентгеноспектрального анализа

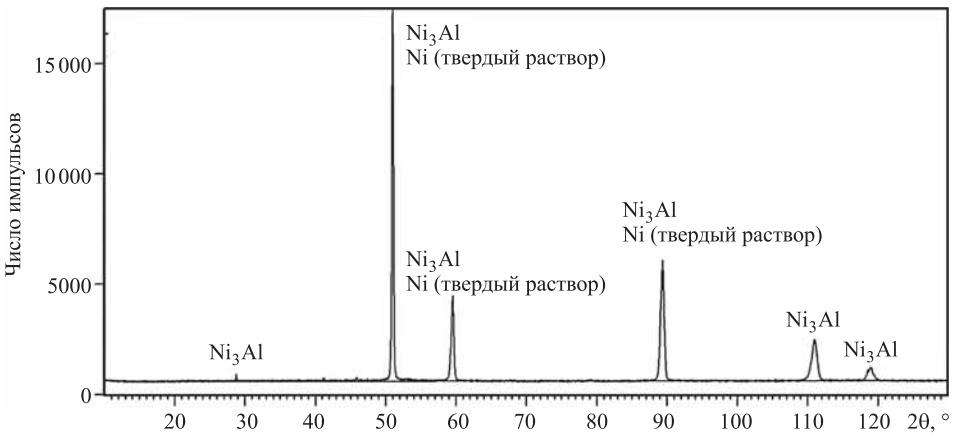


Рис. 8. Результаты рентгенофазового анализа исследуемого сплава

3 и 4 не выявлено особых отличий в структуре. Основываясь на опыте ГИП гранулируемых никелевых сплавов, для последующей закалки и старения был выбран режим № 4.

Для получения высоких механических характеристик ($\sigma_в \geqslant 1250$ МПа, $\delta \geqslant 20$ %) [11, 12] требуется проведение термической обработки, заключающейся в закалке и последующем старении никелевого сплава. В процессе ГИП γ'-фаза выделяется разных размеров и в основном трапецеидальной формы (рис. 6, *а*). При проведении закалки γ'-фаза переходит в γ-твердый раствор и частично остается нерастворенной (рис. 6, *б*), а при последующем старении выделяется равномерно кубической формы по всему объему матрицы (рис. 6, *в*), что является характерным для жаропрочных никелевых сплавов.

С помощью приставки для проведения микрорентгеноспектрального анализа было получено, что в структуре исследуемого сплава помимо упрочняющей γ'-фазы присутствуют карбиды специального типа, такие как $Hf_{23}C_6$, HfC, MoC и Mo_2C (рис. 7). Комплексное упрочнение за счет специальных карбидов гафния, молибдена и равномерного распределения γ'-фазы по всему объему заготовки позволяет в дальнейшем получить высокий уровень механических свойств.

Качественный фазовый анализ показал, что в структуре никелевого сплава преобладают твердый раствор на основе никеля и Ni_3Al, также присутствуют следы карбидной фазы (рис. 8).

Выводы

1. Анализ формирования структуры после различных режимов горячего изостатического прессования показал, что при температуре ГИП 1140 °С проходит неполная диффузия гранул и формируются наследованные границы от гранул. При температурах 1180 и 1190 °С формируется полностью рекристаллизованная структура зерен без наследованных границ. Дальнейшее повышение температуры может привести к оплавлению границ зерен, следовательно, не является рациональным.

2. Разница температур 1180 и 1190 °С и увеличение времени выдержки с 2,5 до 3 ч по режимам № 2, 3 и 4 не позволили достигнуть видимых отличий в структуре. Рекомендованный режим горячего изостатического прессования для жаропрочного никелевого сплава системы Ni—Cr—Mo—Al—Co: $T = 1180$ °С, выдержка 2,5 ч.

3. Комплексное упрочнение, обеспеченное формированием в результате осуществленной после ГИП термической обработки, специальных карбидов и равномерного распределения γ'-фазы по всему объему заготовки, позволяет прогнозировать получение повышенного уровня механических свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Берсенев А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И.** Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул // Вестник МАИ. 2008. № 3. С. 8.

2. **Логунов А.В., Берсенев А.Г., Логачева А.И.** Проблемы и перспективы применения металлургии гранул для ракетно-космической техники // Двигатель. 2008. № 2. С. 8.

3. **Никелевые** литейные жаропрочные сплавы нового поколения / Е.Н. Каблов, Н.В. Петрушин, И.Л. Светлов, И.М. Демонис // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 36—52.

4. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии. В 2 т. Т. 1. Производство металлических порошков. М.: МИСИС, 2001. 368 с.

5. **Пат. № 2327754 РФ.** Жаропрочный сплав на основе никеля.

6. **Технология** гранульной металлурги для получения материалов на основе титана / Т.Г. Жукова, Ю.А. Курганова, Д.М. Ермаков, А.И. Логачева // Техника и технологии машиностроения: Материалы IV междунар. студенческой науч.-практ. конф. Редколлегия: Е.Н. Еремин (отв. редактор), Ю.О. Филиппов, А.Г. Анатольев. Омский гос. техн. ун-т, 2015. С. 83—86.

7. **Жукова Т.Г.** Изменение структуры и свойств гранулированного никелевого сплава под воздействием горячего изостатического прессования // Физико-химия и технология неорганических материалов: сб. материалов XIII Российской ежегодной конф. молодых научных сотрудников и аспирантов. М.: ИМЕТ РАН, 2016. С. 234—235.

8. **Логачева А.И., Жукова Т.Г., Курганова Ю.А.** Формирование заданного комплекса свойств из гранулированного никелевого сплава ЭП741НП // Будущее машиностроения России: сборник докладов Восьмой Всероссийской конф. молодых ученых и специалистов. МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. С. 249—250.

9. **ГИП** и деформация гранулированных жаропрочных никелевых сплавов / Е.И. Разуваев, М.В. Бубнов, М.М. Бакрадзе, С.А. Сидоров // Авиационные материалы и технологии. 2016. № S1. С. 80—86.

10. **Толорайя В.Н., Филонова Е.В., Чубарова Е.Н. и др.** Исследование влияния ГИП на микропористость в монокристаллических отливках безуглеродистых жаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1. С. 20—26.

11. **Логунов А.В., Логачева А.И.** Свариваемый гранулированный жаропрочный никелевый сплав АЖК // Технология металлов. 2009. № 10. С. 13—18.

12. **Логунов А.В., Логачева А.И.** Свариваемый гранулированный жаропрочный никелевый сплав АЖК // Технология металлов. 2009. № 11. С. 17—24.

Татьяна Геннадьевна Севальнёва;
Герман Сергеевич Севальнёв,
herman92@mail.ru;
Юлия Анатольевна Курганова, д-р техн. наук

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАРКИ
СПРАВОЧНИК
Осинцев О.Е., Федоров В.Н.
2-е изд., перераб. и доп. 2016. 360 с.

Цена 1300 руб.

В справочнике впервые систематизированы и обобщены сведения о физических, механических и технологических свойствах почти всех марок меди и сплавов на ее основе: латуней, бронз, медно-никелевых сплавов, а также специальных медных сплавов: микролегированных, дисперсно-упрочненных, с эффектом памяти и др. Показано влияние легирующих элементов и примесей на свойства сплавов. Изложены сведения о составе и структуре, особенностях термической обработки, даны двойные и многокомпонентные диаграммы состояния, определяющие фазовый состав. Приведены также сведения о свойствах зарубежных аналогов отечественных медных сплавов. 2-е издание (1-е издание 2004 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами, а также дополнено сведениями по припоям на основе меди.

Для инженерно-технических работников машиностроительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятий, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также для студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений и университетов.

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

УДК 536.74

А.Р. Луц, Д.В. Закамов
(Самарский государственный технический университет)

Термодинамическая оценка рафинирующего воздействия солей Na_3AlF_6 и Na_2TiF_6 на синтез системы Al—10 % (Ti—C)*

На основе термодинамических расчетов и построенной феноменологической модели химической стадийности протекающих реакций показаны механизмы распада солей Na_3AlF_6 и Na_2TiF_6, добавленных в количестве 1; 5 и 10 % от массы смеси титана с углеродом в систему Al — 10 % (Ti—C). Проведена оценка рафинирующего воздействия продуктов распада солей на оксиды, присутствующие в расплаве алюминия.

Ключевые слова: алюминий; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; композиционный сплав; экзотермическая шихта; соль; флюс.

The mechanisms of decomposition of the Na_3AlF_6 and Na_2TiF_6 salts added in amount of 1; 5 and 10 % by weight of the mixture of titanium and carbon to the Al — 10 % (Ti—C) system are shown based on the thermodynamic calculations and the constructed phenomenological model of the chemical stages of the ongoing reactions. The cleaning effect of the decomposition products of salts on the oxides present in the aluminum melt is evaluated.

Keywords: aluminum; self-propagating high-temperature synthesis; composite alloy; exothermic mixture; salt; flux.

Создание композиционных материалов с применением метода *самораспространяющегося высокотемпературного синтеза* (СВС) является активно развивающимся направлением в современной металлургии. В настоящее время разработано несколько технологических вариантов СВС, которые позволяют получать алюминиевые литейные сплавы различных классов с широкими возможностями варьирования структуры и свойств [1, 2].

Одно из наиболее востребованных направлений СВС — создание композиционного сплава системы Al—TiC [3, 4]. Российскими учеными также был проведен ряд работ на эту тему, в которых было показано, что обязательным условием для синтеза качественных композиционных сплавов является добавка в состав шихты флюсовых компонентов различного состава (МХЗ, Na_3AlF_6 и др.) [5, 6]. Однако их количество варьировали в интервале 1...10 % от массы шихты, вводимой в расплав, и установили, что введение флюсов в количестве менее 1 % недостаточно для полноценного рафинирования расплава алюминия и активизации СВС-реакции, а добавка свыше 10 % приводит к значительному увеличению количества шлака и сокращению выхода годного продукта.

Цель исследования — обоснование выбора флюсовых компонентов, термодинамическое изучение процесса рафинирования в системе Al—10 % (Ti—C) и определение оптимального количества добавки флюса.

Основу большинства флюсов составляют, как правило, галоидные соли щелочных металлов, которые определяют конечные технологические свойства: текучесть, смачиваемость, химическую активность. Фтористые соли действуют как поверхностно-активные вещества, снижающие поверхностное натяжение между флюсом и металлом, а также между флюсом и оксидами. Хлористые соли проявляют это свойство в значительно меньшей степени [7].

Фтористые соли щелочных металлов способны растворять оксиды и проникать в оксидные пленки, содержащие металлический алюминий в шлаке и скоплениях загрязнений. Также фтористые соли щелочных металлов имеют высокую температуру плавления, и этот факт существенно ограничивает их применение в традиционных литейных техноло-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 17-48-630695.

гиях, но благоприятен для проведения процессов СВС, характеризующихся высокими температурами синтеза.

Таким образом, использование фтористых солей щелочных металлов в качестве рафинирующей добавки является более обоснованным, поэтому для исследования были выбраны соли: натриевый криолит Na_3AlF_6 и гексафтортитанат натрия Na_2TiF_6, общая характеристика которых приведена на рис. 1.

Термодинамические исследования были выполнены с применением комплекса программ "THERMO", разработанного в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН (г. Черноголовка) для осуществления расчетов термодинамического равновесия в сложных многоэлементных гетерофазных системах. Он включает в себя банк данных термодинамической информации, программу расчета коэффициентов термодинамических функций для новых соединений. Расчет температур горения смеси различных элементов или соединений проводится в предположении адиабатичности процесса, т.е. отсутствия теплопотерь из зоны реакции для случая полного превращения реагентов.

Известно, что поверхность твердых частиц, вводимых при СВС в расплав алюминия, в результате взаимодействия с окружающей атмосферой в значительной степени оказывается окисленной, это негативно влияет на смачиваемость частиц жидким алюминием, что затрудняет прохождение СВС-реакции и может приводить к образованию агломератов.

Одним из наиболее эффективных методов очистки поверхности твердых частиц, входящих в состав шихты, как было указано выше, является ввод в расплав флюсов — фторидов щелочных металлов, продукты разложения которых способны вступать в реакции с оксидами с образованием легко удаляемых соединений [8]. Благоприятен также вариант образования летучих соединений, которые, поднимаясь наверх, увлекают за собой мелкие частицы неметаллических примесей, что также способствует рафинированию расплава.

Результаты термодинамического расчета распада солей Na_3AlF_6 и Na_2TiF_6, введенных в количестве 1; 5 и 10 % от массы шихты, представлены на рис. 2 и 3.

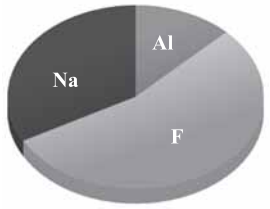
При добавлении 1 % солей в обоих случаях образуются газообразные соединения: Na, AlF, $Na_5Al_3F_{14}$ (хиолит), $NaAlF_4$. Очевидно, в связи с тем, что Na_3AlF_6 имеет большую температуру плавления, некоторое количество этого соединения еще присутствует при начальных исследуемых температурах, но полностью распадается при температуре расплава 1273 К, в то время как соединение Na_2TiF_6 в первоначальном состоянии не фиксируется уже при 1173 К. При использовании Na_3AlF_6 в большем количестве образуется газообразный Na, а при использовании Na_2TiF_6—AlF, а также дополнительный рафинирующий компонент AlF_3.

При добавлении 5 % солей в обоих случаях выделяется значительно большее количество газообразных соединений; к существовавшим ранее добавляется также газообразный NaF.

При добавлении 10 % солей в обоих случаях сохраняется тенденция предыдущего состава, но образующихся газообразных соединений в 2 раза больше.

С точки зрения эффективности рафинирования, наибольшее количество газообразных компонентов обеспечивает добавка солей в количестве 10 %, однако при этом возможно образование большого количества шлака. Поэтому оптимальное количество солей, рекомендуемое к использованию, составляет 5 % от массы шихты. Обе исследуемые соли оказывают значительный рафинирующий эффект, однако предпочтение следует отдать соли Na_2TiF_6, поскольку в случае ее применения образуется большее количество летучих соединений.

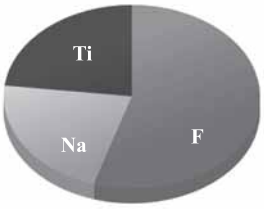
Элемент	Атомная масса	Число атомов	Содержание, %
Al	26,092	1	12,5
F	18,998	6	54,5
Na	22,99	3	33,0



$T_{пл}$ = 1284 К

а)

Элемент	Атомная масса	Число атомов	Содержание, %
F	18,998	6	54,8
Na	22,99	2	22,1
Ti	47,956	1	23,1



$T_{пл}$ = 1187 К

б)

Рис. 1. Химический состав солей:
а — Na_3AlF_6; *б* — Na_2TiF_6

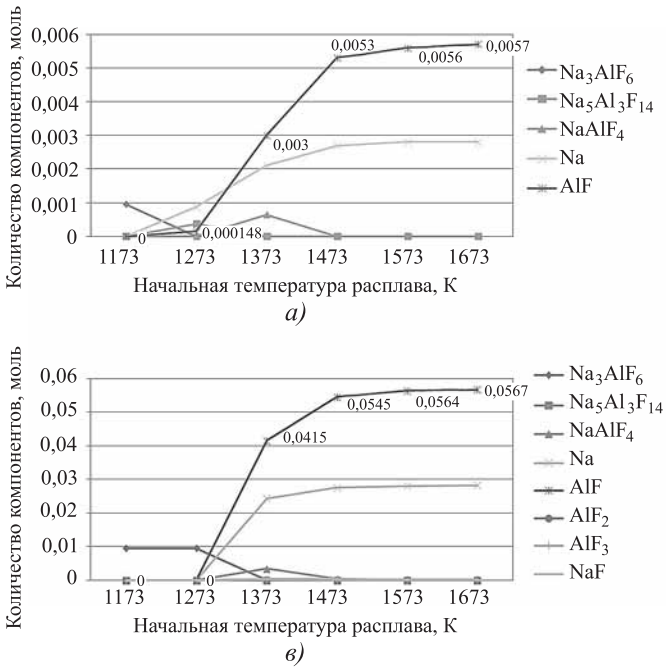


Рис. 2. Изменение количества компонентов системы при добавлении 1 % (*а*), 5 % (*б*) и 10 % (*в*) соли Na_3AlF_6 от массы шихты Ti—C

На основании полученных термодинамических параметров системы была построена феноменологическая модель стадийности протекающих реакций.

Система (Al—TiC)—Na_3AlF_6. При начальных температурах расплава алюминия свыше 1173 К адиабатическая температура системы способна достигать значения 1300 К, что близко к температуре плавления соли Na_3AlF_6 (1284 К); в этот момент запускается процесс распада соли Na_3AlF_6:

$$7\ Na_3AlF_6 + 2Al = 3Na_5Al_3F_{14} + 6Na\uparrow \quad (1)$$

$$Na_5Al_3F_{14} + 5Al = 2NaAlF_4 + 3Na\uparrow + 6AlF\uparrow \quad (2)$$

$$NaAlF_4 + 3Al = Na\uparrow + 4AlF\uparrow. \quad (3)$$

Одновременно с распадом соли Na_3AlF_6 продукты ее разложения оказывают рафинирую-

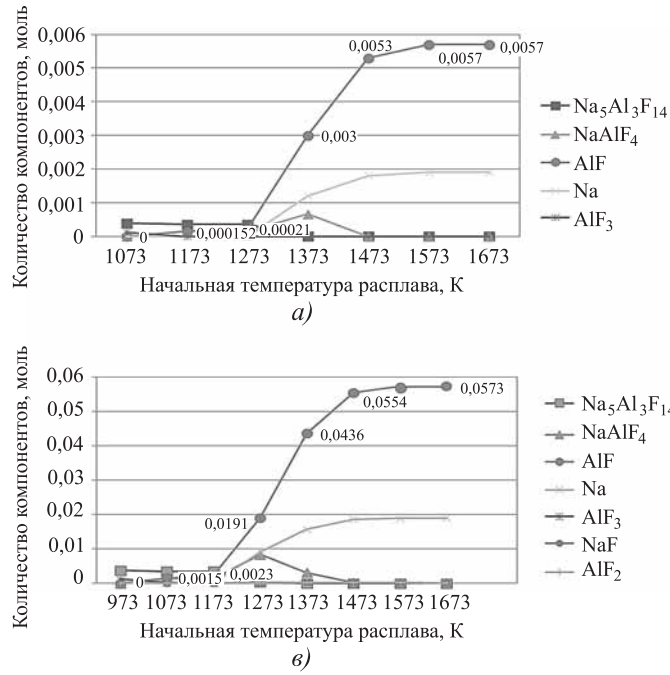


Рис. 3. Изменение количества компонентов системы при добавлении 1 % (*а*), 5 % (*б*) и 10 % (*в*) соли Na_2TiF_6 от массы шихты Ti—C

щее действие на оксиды алюминия и титана, присутствующие в расплаве. В частности, возможны следующие реакции:

$$6Na_5Al_3F_{14} + 5Al_2O_3 + 56Al = 15Na_2O\uparrow + 84AlF_3\uparrow \quad (4)$$

$$4Na_5Al_3F_{14} + 5TiO_2 + 56Al = 10Na_2O\uparrow + 5Ti\uparrow + 56AlF\uparrow \quad (5)$$

$$6NaAlF_4 + Al_2O_3 + 16Al = 3Na_2O\uparrow + 24AlF\uparrow \quad (6)$$

$$4NaAlF_4 + TiO_2 + 12Al = 2Na_2O\uparrow + Ti + 16AlF\uparrow \quad (7)$$

Газообразные соединения оксида натрия и фторида алюминия поднимаются на поверхность расплава, увлекая за собой мелкие примеси, и удаляются вместе со шлаком.

Система (Al—TiC) — Na_2TiF_6. Отличие данной системы состоит в том, что процесс распада соли Na_2TiF_6 становится возможным при начальных температурах системы выше 973 K (адиабатическая температура системы 1200 K), при температуре плавления соли Na_2TiF_6 (1187 K) по реакциям:

$$5Na_2TiF_6 + 8Al = 2Na_5Al_3F_{14} + 2AlF\uparrow + 5Ti \quad (8)$$

$$Na_5Al_3F_{14} = 3NaAlF_4 + 2NaF\uparrow \quad (9)$$

$$NaAlF_4 + 3Al = Na\uparrow + 4AlF\uparrow \quad (10)$$

В результате образуются те же продукты: $Na_5Al_3F_{14}$ и $NaAlF_4$, взаимодействующие с оксидами алюминия и титана по реакциям (4—7) и газообразные продукты AlF, Na, NaF.

Заключение. На основании проведенных термодинамических исследований можно сделать вывод о том, что обе фтористые соли Na_3AlF_6 и Na_2TiF_6 распадаются с образованием большого количества газообразных продуктов, способных осуществлять эффективное рафинирование системы Al — 10 % (Ti—C). Наибольшее количество газообразных соединений образуется в случае применения соли Na_2TiF_6, что позволяет рекомендовать ее к использованию в количестве 5 % от массы шихты Ti — C.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Научно-технические** основы применения процессов СВС для создания литых алюмоматричных композиционных сплавов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами / А.П. Амосов, В.И. Никитин, К.В. Никитин, С.А. Рязанов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2013. № 8. С. 3—10.
2. **Прусов Е.С., Панфилов В.А., Кечин В.А.** Влияние условий плавки и литья алюмоматричных нанокомпозитов на структуру литых заготовок // Литейщик России. 2017. № 4. С. 10—15.
3. **Lecatou A., Karantzalis A.E., Evangelou A.** Aluminum reinforced by WC and TiC nanoparticles (in-situ): Microstructure, wear and corrosion behavior // Mat. & Design. 2014. Vol. 65. P. 1121—1135.
4. **Fallahdoost H., Nouri A., Azimi A.** Dual Functions of TiC nanoparticles on tribological performance of Al/grafite composites // J. of Physics and Chemistry of Solids. 2016. Vol. 93. P. 137—144.
5. **Луц А.Р., Макаренко А.Г.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез алюминиевых сплавов. Самара: СамГТУ, 2008. 175 с.
6. **Применение** процессов СВС для получения in situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными частицами карбида титана: Обзор / А.П. Амосов, А.Р. Луц, Е.И. Латухин, А.А. Ермошкин // Известия вузов. Цветная металлургия. 2016. № 1. С. 39—49.
7. **Utigart T.A., Friesen K., Roy R.R. et al.** The Properties and Uses of Fluxes in Molten Aluminum Processing // JOM. 1998. Vol. 5. P. 38—43.
8. **Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М.** Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: МИСИС, 1996. 504 с.
9. **Song X., Zhang J., Li L. et al.** Correlation of thermodynamics and grain growth kinetics in nanocrystalline metals // Acta Mater. 2006. Vol. 54. No. 20. P. 5541—5550.
10. **Study** of formation behavior of TiC ceramic obtained by self-propagating high-temperature synthesis from Ai—Ti—C elemental powders / M.S. Song, B. Huang, M.X. Zhang, J.G. Li // Int. J. Refractory Met. Hard. Mater. 2009. Vol. 27. P. 584—589.

Альфия Расимовна Луц, канд. техн. наук,
alya_luts@mail.ru;
Дмитрий Васильевич Закамов, канд. техн. наук

УДК 621.774

С.Н. Полянский[1], С.В. Бутаков[2], И.С. Ольков[2], М.О. Ледер[3], М.В. Попов[3], Л.В. Мальцев[2]
([1]ООО "ИнТеК", г. Екатеринбург,
[2]Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
[3]Корпорация ВСМПО-АВИСМА, г. Верхняя Салда)

Методы удаления окалины и газонасыщенного слоя с поверхности полуфабрикатов из сплавов титана

Представлены технология и оборудование обработки поверхности полуфабрикатов на стадиях металлургического передела. Рассмотрены задача удаления дефектных слоев с поверхности полуфабрикатов из сплава титана, а также новые типы турбин и марок дроби. Выполнен анализ методов струйно-абразивных технологий.

Ключевые слова: обработка поверхности; удаление дефектных слоев металла; травление; дробеметная обработка; газонасыщенный и переходный слои; экология.

Technology and equipment for treatment of semifinished items surface on metallurgical plants are presented. The problem of removal of defective layers from the surface of semifinished items from titanium alloy, as well as new type turbine and shot are considered. Technologies of abrasive jet machining are analyzed.

Keywords: treatment surface; descaling; pickling; shot blasting; gas-saturated and transition layers; ecology.

Процесс производства полуфабрикатов состоит из многократно повторяющихся операций передела, включающих термическую и химическую обработку. Традиционно в промышленности применяют методы механической и химической очистки поверхности полуфабрикатов от окалины, инородных загрязнений и технологических дефектов [1—4].

Технологический нагрев изделий проводят в электрических и газовых печах в окислительной атмосфере (см. кн.: Бай А.С. Окисление титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1970. 320 с.). При нагреве происходит проникание из газовой среды кислорода, водорода и азота в металл, при этом образуются поверхностный диффузионный слой, являющийся твердым раствором внедрения, и переходный слой (рис. 1).

При нагревах до температуры 600...700 °С на поверхности титановых сплавов без защиты оксиды образуют плотный, прочно связанный с основным металлом слой толщиной до 2...3 мкм и слой твердого раствора кислорода (газонасыщенный или альфированный слой).

Альфированный слой отличается по структуре от основного металла повышенным содержанием α-фазы, что легко выявить металлографическим анализом.

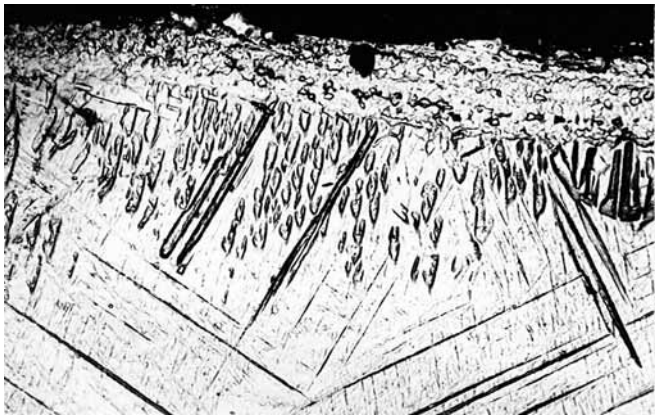


Рис. 1. Поверхность изделия из титанового сплава ВТ6 после нагрева (1100 °С, 3 ч) на воздухе. ×500

Последующий переходный слой по микроструктуре практически не отличается от основного металла. Параметры переходного слоя определяют сравнительным анализом микротвердости.

Альфированный слой не содержит гидридов. Интенсивность наводороживания возрастает с повышением влажности воздуха. Гидриды появляются на некотором расстоянии от поверхности, поскольку кислород увеличивает растворимость водорода в α-титане. Азот из воздуха попадает в поверхностный слой титановых сплавов только при высокотемпературных нагревах (выше 1000 °С) и в незначительном количестве.

Твердость альфированного слоя максимальна у поверхности (700...1200 HV), с последующим уменьшением. Толщина газонасыщенного слоя при нагреве 700 °С в течение 10...15 ч составляет 50...70 мкм. С повышением температуры и длительности нагрева толщина альфированного слоя резко увеличивается. Глубина газонасыщенного слоя в плитах сплава Ti6Al4V толщиной 5,5 мм, полученных при традиционных режимах обработки, составляет 650...750 мкм [5].

Газонасыщенный кислородом диффузионный слой на поверхности заготовок, как правило, имеет сетку трещин (после охлаждения), придает заготовкам или полуфабрикатам большую хрупкость, поэтому в готовом полуфабрикате недопустим (за исключением поковок, которые в дальнейшем подвергают круговой механической обработке).

При производстве титановых полуфабрикатов предусмотрена защита поверхности заготовок от газонасыщения. Поверхность заготовок перед операциями высокотемпературного продолжительного нагрева защищают стеклокерамическими или металлическими покрытиями. Покрытия существенно уменьшают глубину дефектных слоев металла, но повышают трудоемкость операции очистки поверхности после нагрева и деформации. К сожалению, в настоящее время нет прогресса в разработке самоскалывающихся покрытий. Существующие покрытия образуют на поверхности трудноудаляемые соединения, в частности, интерметаллидные (рис. 2).

Удаление этих слоев является интегрированной частью операции обработки поверхности и существенно оптимизирует механические свойства изделий (ASTM B 600). Процедура выявления и удаления дефектных слоев очень трудоемка. Толстые оксидные пленки и альфированный слой удаляют с поверхности титана преимущественно механически; тонкие — химическим или электрохимическим способом.

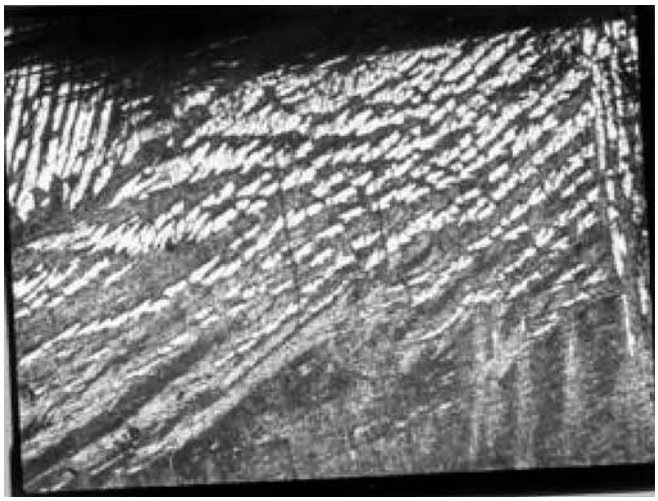


Рис. 2. Поверхность заготовки из сплава Ti6Al4V после горячей штамповки. ×50

Поверхность полуфабрикатов перед операциями деформирования необходимо очищать от окалины, оксидов, дефектных слоев и загрязнений, а также устранять поверхностные дефекты, такие как трещины, царапины или следы шлифовки. Все царапины глубже получаемых при обработке корундом фракцией 76 мкм (180 грит) удаляют, как правило, пескоструйной обработкой.

Для предотвращения кромочного разрушения заусенцы и острые кромки притупляют [6]. Экспериментально получено, что плиты с травленой поверхностью имеют лучшую деформируемость в сравнении с плитами, обработанными дробью и/или шлифованными [6].

Для операций сверхпластичной вытяжки рекомендовано использовать листы с нерегулярной ("песочной") текстурой поверхности [7]. Современные технологии формируют на поверхности заготовок перед операцией деформирования микрокарманы для будущей смазки методами струйно-абразивной обработки [8]. Таким образом предупреждается возникновение эффекта "пленочного голодания".

Задача удаления газонасыщенных и переходных слоев металла представляет повышен-

ный интерес исследователей и производителей полуфабрикатов и изделий из сплавов титана [1].

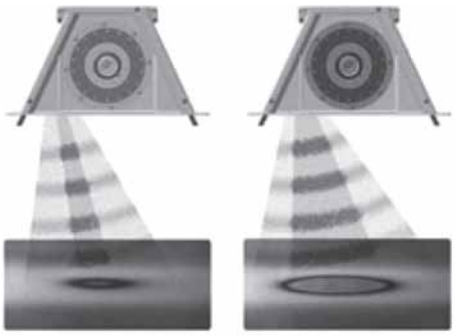
Традиционно для удаления и/или разрыхления окалины используют химические и/или механические методы обработки с последующим удалением газонасыщенного слоя кислотным травлением. Продолжают применять установки щелочения (в растворе и расплаве) для разрыхления окалины на поверхности двухфазных сплавов в ваннах солевого расплава, несмотря на запреты санитарно-экологических служб и следующие недостатки: высокая энергоемкость и продолжительность, высокая стоимость исходного сырья и утилизация хвостов (второй класс опасности). При операции кислотного травления доказана роль случайных факторов возникновения дефектов, особенно в массовом производстве крупногабаритных деталей.

В процессах производства полуфабрикатов отмечают устойчивую тенденцию к сокращению нагрузки на кислотное хозяйство.

В металлургической отрасли успешно применяют дробеметные способы удаления окалины с поверхности проката, поковок и др., технологию и оборудование которых постоянно совершенствуют. Разработаны новые турбины, высокопрочные материалы импеллера, клапаны подачи дроби.

Для совершенствования процесса дробеметной обработки поверхности бунтов из сплавов титана компания Timet сотрудничает с разработчиком дробеметных технологий и оборудования Wheelabrator Allevard, Pangborn Corporation [9]. В частности, проведена модернизация дробемета на заводе в г. Торонто (обрабатывают 2—3 бунта в смену, стоимость 300 000 $ каждый). В результате установки новых колес, высокопрочных плит из марганцовистой стали, средств улучшения потока дроби, клапана Magna Valves снижены продолжительность и частота обслуживания, повышены производительность и надежность, стабильность потока дроби.

Корпорацией Wheelabrator запатентовано колесо турбины, позволяющее за счет уникально высокой скорости частиц, а следовательно, и их кинетической энергии увеличить факел, т.е. площадь обработки (рис. 3). Это только одно из решений комплекса FICEP [10]. В технологическом центре корпорации Wheelabrator



а) *б)*

Рис. 3. Схемы факела абразива:
а — стандартный; *б* — ETA

разработаны новые типы турбин TITAN, EZEFITHD, SATURNHD. Самые современные решения представлены в конструкции турбины COMETHD. В испытательных центрах достигнута скорость частиц 140 м/с, что в 2 раза превышает существующие значения.

Еще одним значимым направлением развития технологии дробеметной обработки является разработка и внедрение новых марок дроби (табл. 1). Компания Wheelabrator производит новые марки дроби: Sablacier, HPG, Staniun, Delta [11]. Марки HPG и Staniun относят к классу "Premium". Дробь HPG из мягкой углеродистой стали характеризуют форма зерен, гранулометрический состав, однородность и стабильность рабочей смеси. Дробь Staniun предназначена для операций удаления

1. Характеристика дроби

Марка дроби	Размер, мм	Твердость	Сферичность, %	Плотность, г/м^3
WGL 014	1...2,36	560...634 HV 53...57 HRC	10 (max)	7,6 (мартенсит)
WGP 018	0,71...1,7	484...544 HV 48...52 HRC		
WGH 012	1,18...2,8	800 HV 64 HRC		
WS 170	0,355...0,85	392...530 HV 40...51 HRC	95 (min)	7,4 (мартенсит)
HPG	1,0 1,7	480...550 HV 47...52 HRC	Остроугольная	7,6
Stanium	0,30 0,85	450...550 HV 45...52 HRC	Смесь круглой и колотой	7,5

окалины с минимальным повреждением поверхности [12].

Применение дроби HPG снижает затраты на дробеметную очистку на 15 % благодаря повышению производительности (15...20 %), сокращению расхода дроби (40 %) и энергии, продлению срока службы деталей. Высокая эффективность и стойкость дроби позволяют повысить скорость частиц (более 90 м/с), обрабатывать поверхности сложного контура. В [12] показана высокая эффективность удаления окалины с поверхности кованых изделий.

В табл. 2 приведена сравнительная стоимость дробеметной обработки.

В последние годы в качестве материала технологической среды дробемета получила применение пульпа, технология "экологичного травления" (EPS) поверхности [13]. Операция EPS апробирована для удаления окалины после прокатки с поверхности горячекатаных стальных полос. В отличие от кислотного травления в технологии EPS используют воду и стальную дробь, поверхность очищается более равномерно. Установлено, что такая поверхность обладает врожденной сопротивляемостью коррозии в сухом состоянии, т.е. необходимости применения масляных пленок или защитных покрытий для защиты от коррозии нет. По сравнению с кислотным травлением стоимость капитальных затрат уменьшена на 20 %, а эксплуатационных затрат — на 30 %. Получены лучшие результаты при испытаниях натурных образцов в солевом тумане, адгезии красок, скорости резки лазером.

Дробеметные ячейки, встроенные в линии TMW [13], посредством вращающихся импеллеров ускоряют смесь воды с абразивными металлическими частицами, направленную на поверхность рулонной полосы, очищая сталь от грязи и окалины (рис. 4). Пульпа включает в себя металлические частицы нерегулярной формы, воду, ингибиторы коррозии. При разрушении кромки частиц скругляются и притупляются от ударов. Пульпу освежают свежим абразивом.

2. Сравнение затрат при операции дробеметной обработки, евро/т [11]

Статья затрат	Дробь	
	существующая	HPG
Утилизация отходов	0,09	0,06
Запасные части	0,57	0,46
Изнашиваемые детали	1,14	0,93
Энергия	0,59	0,51
Абразив	1,71	1,45
Общие затраты	4,1	3,41

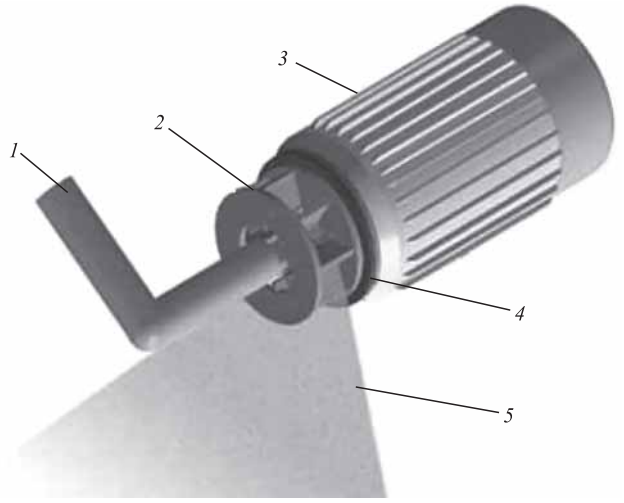
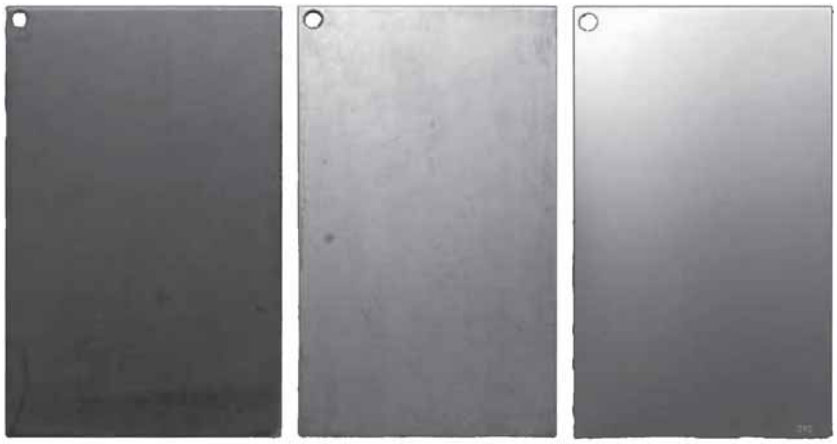


Рис. 4. Схема факела дробеметного аппарата EPS:
1 — подача пульпы; *2* — импеллер (внутренняя камера метания); *3* — мотор привода импеллера; *4* — фланец (уплотнение утечек из камеры метания); *5* — ударный поток пульпы

Поверхность листов после обработки пульпой имеет однородную структуру без видимых следов обработки (рис. 5). Среднее значение параметра шероховатости поверхности листов после очистки методом ESP составляет Ra = = 1,8...2,2 мкм, после кислотного травления — Ra = 1,25...1,50 мкм [14]. Доказано, что текстура поверхности листов имеет оптимальные характеристики для технологии покрытий.

В последние годы для удаления окалины с поверхности полуфабрикатов применяют механические струйно-абразивные методы обработки (САО). В качестве энергоносителя струй используют сжатый воздух низкого давления (до 1,2 МПа), воду низкого, среднего или высокого давления (до 280 МПа).

В качестве материала технологической среды отдают предпочтение минеральным рафинированным частицам. Возросло применение продуктов переработки и утилизации промышленных отходов. Отмечен рост использования шлаков (никелевых, медных и др.) в операциях пескоструйной обработки



а) *б)* *в)*

Рис. 5. Поверхность образцов листовой рулонной горячекатаной стали:
а — исходная; *б* — после кислотного травления; *в* — после процесса EPS

с 3,1 % в 2001 г. [15]. Следует отметить расширение сфер применения технологий САО, до 2001 г. их использовали преимущественно для обработки изделий из черных металлов, (44,9 %), доля цветных металлов не превышала 10 % [14].

Сделаны попытки решить задачу применительно к сплавам титана и циркония, нержавеющим сталям и т.п. методами обработки поверхности высокоскоростными водовоздушными струями (ВВС) низкого давления, наполненными рафинированными частицами [16].

Доказаны преимущества разработанной технологии для удаления окалины и оксидных пленок, органических и неорганических загрязнений с поверхности полуфабрикатов, в том числе сложноконтурных, тонкостенных ажурных деталей [17].

В ходе развития и расширения функций технологии ВВС выполнены попытки решить задачи обработки поверхности полуфабрикатов. Проведены исследования и определены параметры процесса ВВС для удаления дефектных, в частности, газонасыщенных слоев металла. В опытах использовали натурные образцы листов из сплава Ti6Al4V толщиной 1,0...2,5 мм после термической обработки (750 °С, 0,5 ч). Исходный параметр шероховатости поверхности Ra = 0,15 мкм.

Рассмотрена возможность регламентированного удаления металла при обработке ВВС. На первом этапе сделана попытка установить зависимость удаляемого слоя при условии получения поверхности листов с Ra не более 1,0 мкм. Использовали регенерированный электрокорунд (ТУ 3988-004-0022-1899—2011) четырех фракций в диапазоне 10...40 мкм. В качестве энергоносителя применяли сжатый воздух давлением 0,58...0,60 МПа, угол атаки 45°, расстояние до мишени 100 мм, расход пульпы 3,5...6,0 л/мин, концентрацию пульпы 20 % об., диаметр смесительной трубки 12 мм.

Для проведения испытаний изготовлен стенд с фиксатором для крепления темплета на суппорте, снабженный механизмом винтового перемещения. Длина продольного хода суппорта 500 мм. Монитор с инструментом подачи струи к темплету закрепляли шарнирно на штативе с возможностью установки угла атаки и расстояния до обрабатываемой поверхности. После каждого прохода осуществляли поперечное перемещение суппорта на шаг, который выбирали с учетом ширины обрабатываемой дорожки и степенью перекрытия 150...200 %.

После каждого прохода измеряли толщину образца дискретно по ширине обработанной дорожки. Исходя из результатов измерения, варьировали шаг перемещения монитора. Другим переменным параметром являлась скорость перемещения суппорта. Параметры процесса ВВС постоянные на всех этапах испытаний.

В результате испытаний установлена толщина удаляемого слоя металла (съем металла) в зависимости от скорости перемещения суппорта и размера зерен абразива (рис. 6). Интенсивность съема металла с ростом скорости в 3 раза снижается в 2,3—2,6 раза для всего диапазона исследуемых фракций абразива. Увеличение размера зерен абразива от 10 до 40 мкм повышает скорость съема металла в среднем в 2,5 раза.

Параметр шероховатости обрабатываемой поверхности повышается с увеличением размера зерен абразива практически по линейной зависимости. Интенсивность роста параметра шероховатости практически не зависит от продолжительности обработки (рис. 7).

Установлено, что толщина удаляемого слоя металла и параметр шероховатости поверхно-

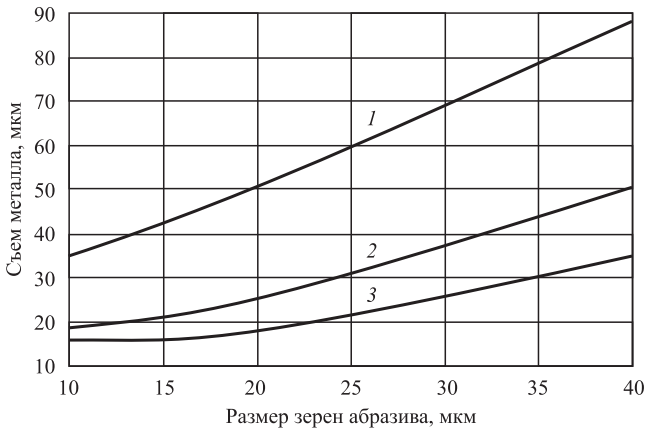


Рис. 6. Влияние размера зерен абразива на съем металла в зависимости от скорости линейного перемещения, м/мин:
1 — 0,22; *2* — 0,43; *3* — 0,65

сти возрастают практически линейно с увеличением размера зерен абразива. Повышение производительности за счет увеличения размера зерен абразива приводит к росту параметра шероховатости поверхности.

Для получения заданных характеристик поверхности листа рекомендовано использовать абразив размером зерен до 40 мкм и давление 0,6 МПа. Показано, что эти два параметра оказывают наибольшее влияние на производительность процесса. Для удаления окалины толщиной 40...60 мкм скорость перемещения сопла относительно поверхности обрабатываемого изделия составляет не более 0,2 м/мин. При продолжении работ предполагают повысить производительность за счет увеличения давления энергоносителя и уменьшения проходного сечения сопла, для остальных параметров — сохранить существующие режимы обработки.

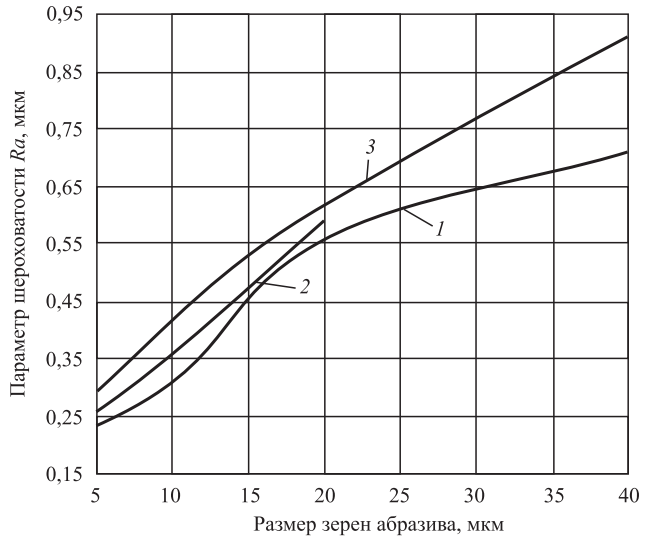


Рис. 7. Зависимость параметра шероховатости поверхности образцов от размера зерен абразива и продолжительности обработки, с:
1 — 5; *2* — 10; *3* — 15; исходный параметр *Ra* = 0,15 мкм

В данной работе выполнен анализ существующих методов обработки поверхности полуфабрикатов (штамповки, плиты) из сплавов титана, а также исследован новый способ обработки поверхности тонких листов. Приведены характеристики состояния поверхности и приповерхностных слоев при различных режимах термической обработки.

В настоящее время химическое травление является обязательной операцией финишной обработки поверхности всех видов полуфабрикатов. Установлена общая тенденция производителей к сокращению нагрузки на кислотное хозяйство до минимума, поскольку технология требует создания мощностей по регенерации и утилизации кислотных растворов и шламов. Также на практике зафиксировано высокое количество возвратов изделия на повторное травление.

Традиционные механические методы обработки постоянно совершенствуют, создают новое оборудование, инструмент, материалы технологической среды. Современные конструкции турбин дробеметов увеличивают скорость дроби в 2 раза. Новые марки дроби уменьшают затраты на дробеметную обработку на 15 %. Отечественные производители изделий из титана используют оборудование и материалы импортного производства.

Рассмотрен новый процесс дробеметной обработки с применением пульпы. Получаемая текстура поверхности имеет оптимальные характеристики для технологий покрытий, также обеспечивает коррозионную защиту. Отмечен рост применения струйно-абразивных технологий для обработки поверхности изделий из цветных сплавов.

Технология ВВС позволяет регламентировать толщину слоя удаляемого металла и обеспечить равномерность обработки (размер и тональность). Технологичность способа и универсальность инструмента позволяют проводить обработку всей номенклатуры изделий.

Выводы

Процесс обработки поверхности полуфабрикатов является многооперационным, трудоемким, с постоянным контролем показателей качества поверхности.

Технология кислотного травления удовлетворяет современным требованиям качества и контроля полуфабрикатов. Нагрузку на кислотное хозяйство перманентно сокращают.

Технология дробеметной обработки более экономична и производительна, однако требует дополнительной финишной обработки для удаления остатков окалины и дефектных слоев металла, а также не охватывает полную номенклатуру обрабатываемых полуфабрикатов, в частности, тонкостенные и ажурные детали с труднодоступными участками.

Альтернативные методы механической очистки поверхности, в частности, струйно-абразивные (ВВС), имеют оптимальные показатели качества обрабатываемой поверхности. К недостаткам относят низкую производительность при реализации задачи удаления металла с поверхности полуфабрикатов с применением существующей генерации оборудования.

Решение поставленной задачи удаления дефектных слоев металла в одной операции требует разработки новой генерации рассмотренных процессов, исследования операций обработки поверхности с применением лазера, плазмы, жидкого азота, гибридных и других новейших технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С.** Титановые сплавы: справочник. М.: ВИЛС — МАТИ, 2009. 520 с.
2. **Александров В.К., Аношкин А.Ф., Белозеров А.П. и др.** Полуфабрикаты из титановых сплавов / под ред. А.Ф. Аношкина, М.З. Ерманока. М.: ВИЛС, 1996. 518 с.
3. **Аношкин Н.Ф.** Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М.: Металлургия, 1980. 464 с.
4. **Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др.** Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 92 с.
5. **Huang L.** etc. / Prcedia CIRP 6 (2013). P. 594—599.
6. **http://www.rtiintl.com** (дата обращения: 12.04.2017)
7. **Пат. 2152865 РФ.** Способ обработки поверхности изделий / Заявл. 10.02.1999; опубл. 20.07.2000 // Полянский С.Н., Тетюхин В.В., Левин И.В., Козлов А.Н.
8. **Исаков М.Г.** Микрокарманы смазки, формирование. Ижевск, 2001.
9. **The Shot Peener**. 2005. P. 12—14.
10. **http://www.wheelabrator.com** (дата обращения: 20.06.2017)
11. **Metal Finishing News**. 2007. Iss. September. Vol. 6. P. 24.
12. **http://www.wabrasive.com** (дата обращения: 15.02.2017)
13. **http://www.epsprocess.com** (дата обращения: 25.01.2017)
14. **Tripplett T.** Pickled surfacing increases roughness range // Modern Metals. 2013. March. P. 20—23.
15. **Daniel W., DeKruif.** Aerospace Coatings Removal and Coatings / Conference. South west Research Institute. 2003.
16. **Полянский С.Н., Смеян М.А., Попов М.В.** Оборудование очистки поверхности полуфабрикатов // Цветные металлы. 2003. № 1.
17. **Полянский С.Н., Бутаков С.В.** Ресурсосберегающие технологии обработки поверхности металлических полуфабрикатов // Металлург. 2014. № 1. С. 37—40.

Сергей Николаевич Полянский, канд. техн. наук, psn50@mail.ru;
Сергей Васильевич Бутаков, канд. техн. наук;
Игорь Сергеевич Ольков;
Михаил Оттович Ледер;
Максим Владимирович Попов;
Лев Витальевич Мальцев, канд. техн. наук

Уважаемые коллеги!

Международный союз машиностроителей, Донецкий национальный технический университет и ряд ведущих университетов и организаций различных стран

10—18 сентября 2018 г. в Севастополе

проведут юбилейную

XXV Международную научно-техническую конференцию

"МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА"

Основная тематика конференции

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий. Интегрированные технологии. Сборка в машиностроении, приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии
2. Механизация и автоматизация производственных процессов. Прогрессивное оборудование
3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления производством. Экономические проблемы техносферы
4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов
5. Управление качеством продукции и технических систем. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий
6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин
7. Современные проблемы инженерии материалов, процессов и материаловедения в машиностроении. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии
8. Вопросы моделирования и расчетов технических систем
9. Специальная техника и технологии техносферы. Экологические проблемы техносферы
10. Современные проблемы инженерного образования. Евроинтеграция в образовании

Адрес оргкомитета

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58,
ДонНТУ, кафедра "Технология машиностроения", Оргкомитет
☎ Тел./факс: +38 062 305-01-04, +38 062 301-08-05
☎ Моб. тел.: +38 050 6202396; +7 978 1369454 (во время конференции)
✉ E-mail: tm@fimm.donntu.org или mntk21@mail.ru
http://konf-sev.donntu.org, http://iumb.donntu.org, http://www.donntu.org

Михайлов Александр Николаевич — председатель,

Голубов Николай Васильевич — ученый секретарь.

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 08.05.2018. Подписано в печать 03.06.2018. 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.

Памяти
Александра Александровича
БОГАТОВА
(10.09.1942—20.05.2018)

20 мая 2018 г. скончался д-р техн. наук, профессор кафедры "Обработка металлов давлением" Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина Александр Александрович Богатов.

А.А. Богатов родился 10 сентября 1942 г. в г. Ивдель Свердловской области. В 1965 г. он с отличием окончил кафедру "Обработка металлов давлением" Уральского политехнического института (ныне УрФУ). После окончания института он учился в аспирантуре и работал научным сотрудником в Уральском НИИ черных металлов (с 1964 по 1970 г.). В 1970 г. Александр Александрович вернулся на родную кафедру, на которой он прошел путь от ассистента до профессора. В 1969 г. А.А. Богатов успешно защитил кандидатскую диссертацию под руководством В.Л. Колмогорова, посвященную разработке моделей накопления и залечивания поврежденности металла в процессах обработки металлов давлением, а в 1984 г. — докторскую диссертацию. С 1985 по 1987 г. был деканом металлургического факультета, в 1986 г. избран заведующим кафедрой, в должности которого проработал до 2017 г.

Основные научные результаты, полученные Александром Александровичем, были связаны с разработкой модели изменения поврежденности металла при обработке давлением и термической обработке, созданием новых испытательных машин для исследования пластичности и сопротивления деформации, разработкой и внедрением инновационных технологий и оборудования в ОАО "РЗОЦМ", ОАО "ПНТЗ", ПАО "СинТЗ", ПАО "СевТЗ", ОА "ЕВРАЗ НТМК", ПАО "Корпорация ВСМПО-АВИСМА". В 1999 г. А.А. Богатов возглавлял группу технических экспертов на заводе "Альфатьюб" (Алжир) для разработки рекомендаций по усовершенствованию технологии производства труб нефтяного сортамента и надежности оборудования трубопрокатного агрегата с пилигримовым станом. Под его руководством была разработана экспертная система компьютерного моделирования, автоматизированного проектирования и оптимизации технологических комплексов для производства холоднодеформированных труб, разработаны и внедрены новые технологические процессы и оборудование станов длинооправочного волочения труб и высокопроизводительных поточных линий прокатки, сварки, волочения и отделки.

Результаты научных исследований А.А. Богатова были опубликованы во многих российских и зарубежных научных изданиях, в том числе в более 380 научных работах, двух учебниках, 21 монографии и учебном пособии, 84 авторских свидетельствах СССР и патентах РФ.

А.А. Богатов являлся заслуженным работником высшей школы (1980 г.), почетным работником высшего профессионального образования (2001 г.), лауреатом премии-медали имени выдающегося русского металлурга В.Е. Грум-Гржимайло (2003 г.), заслуженным работником высшей школы Российской Федерации (2005 г.), лауреатом премии-медали имени академика А.И. Берга (2005 г.), премии А.Н. Косыгина (2008 г.), почетным профессором Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого (2008 г.), почетным прокатчиком РФ (2010 г.), лауреатом премии Губернатора Свердловской области в номинации "Профессор года" (2016 г.). Ему были присуждены семь научных наград Минвуза СССР, ВДНХ СССР и АИН РФ им. А.М. Прохорова.

Александр Александрович был членом редакционного совета и автором нашего журнала.

Светлая память об Александре Александровиче Богатове навсегда останется в наших сердцах.
Коллектив редакции и редакционный совет журнала выражают глубокие соболезнования родным и близким Александра Александровича