### ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

### 3ACOTOBNTEJBHUE TPON3BOACTBA B MALLINHOCTPOEHININ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

### Том 17 № 4 апрель **20**19

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. 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. ФИГУРОВСКИЙ Д.К., к.т.н., доц. ШАТУЛЬСКИЙ А.А., 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

Колпаков	B.B.,	Чайкин	A.B.,	Чайкин	B.A.,	Вдовин	K.H.	Совершенствование	
технологии	выпла	авки стал	и 110Г	13Л мето	дом пе	ереплава			.147
Морозов Е	3.П., Р	оманов I	<b>Ю.Г</b> . В	пияние в	лаги, с	одержащ	ейся в	в порошке, на сопро-	
тивляемос	ть обра	азованию	горяч	их трещи	н при л	пазерной і	напла	вке	.155

### Кузнечно-штамповочное производство

Складчиков Е.Н., Гаврилов В.С. Двухкоординатный перекладчик для кривошипного	
горячештамповочного пресса	161
Трегубов В.И., Ларин С.Н., Пасынков А.А., Нуждин Г.А. Оценка влияния геометрии	
инструмента на сиповые параметры совмещенного процесса вытяжки и отбортовки	165

### Прокатно-волочильное производство

Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В., Ризаханов Р.Р. Изготовление прутков и
проволоки из стружки силумина с использованием прямой горячей экструзии цилин-
дрических брикетов
Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. Методика расчета параметров правки листового про-
ката на роликовой правильной машине с роликами различного диаметра175

#### Материаловедение и новые материалы

Морозова Е.А., Морозов А.П., Муратов В.С. Влияние комбинированных воздей-	
ствий на сопротивление усталости алюминиевых сплавов систем Al—Cu—Mg—Mn	
и Al—Zn—Cu—Mg	.179
Жуков А.А., Навоев А.П. Методика выбора температурно-временных режимов двух-	
ступенчатой низкотемпературной цементации зубчатых колес привода агрегатов	
двигателей внутреннего сгорания	184

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.

### **SCIENTIFIC TECHNICAL** AND PRODUCTION JOURNAL

### BLANKING PRODUCTION IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Vol. 17 № 4 April 2019

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. 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 FA OVCHINNIKOV V.V. POVAROVA K B POLETAEV V A SEMENOV B I TREGUROV VI FIGUROVSKY D K SHATUL'SKY A.A. SHPUN'KIN N F YAMPOL'SKY V.M. BAST Yu ÖHLUND F TUTMANN T.

This issue prepared with assistance of specialists: SERIKOVA E.A. ORLOVA A.V.

Journal is registered by Roskomnadzor. The certificate of registration ΠИ № 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 Kolpakov V.V., Chaykin A.V., Chaykin V.A., Vdovin K.N. Hadfield (110G13L) steel smelting technology improvement by remelting .......147 Morozov V.P., Romanov Yu.G. Effect of powder moisture on resistance to formation of hot cracks at laser surfacing .......155 Forging and Stamping Production Tregubov V.I., Larin S.N., Pasynkov A.A., Nuzhdin G.A. Evaluation of effect of tool **Rolling and Drawing Production** Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Ivanov E.V., Rizakhanov R.R., Manufacture of bars and wires from silumin bar with use of direct hot extrusion of cylindrical briquettes ............168 Maksimov E.A., Shatalov R.L. Design procedure of sheet straightening parameters on Physical Metallurgy and New Materials Morozova E.A., Morozov A.P., Muratov V.S. Effect of combination actions on fatigue Zhukov A.A., Navoev A.P. Technique for selection of temperature and time regimes of two-stage low-temperature carburizing of gears of internal combustion engines 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", 2019

### ЛИТЕЙНОЕ И СВАРОЧНОЕ

### LIPONSBOTCLBY



УДК 621.74.94

В.В. Колпаков (Рубцовский филиал АО "Алтайвагон"), А.В. Чайкин (Смоленское региональное отделение Российской ассоциации литейщиков (СРО РАЛ), г. Сафоново), В.А. Чайкин, К.Н. Вдовин (Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)

### Совершенствование технологии выплавки стали 110Г13Л методом переплава

Работа посвящена совершенствованию технологического процесса плавки стали 110Г13Л методом переплава для повышения эффективности рафинирования металла и свойств, снижения себестоимости стали, расширения номенклатуры отливок, выплавляемых методом переплава. Для решения задач снижения угара марганца, увеличения эффективности диффузионного раскисления стали, экономии электроэнергии и дорогостоящих материалов применены три направления совершенствования выплавки стали методом переплава: раннее наведение шлака, повышение эффективности диффузионного раскисления, внепечная обработка расплава. На всех стадиях использованы новые дисперсные материалы, разработанные ООО "Металлург" СРО РАЛ.

**Ключевые слова:** высокомарганцевая сталь; электродуговая печь; технология выплавки; диффузионное раскисление; шлаковый режим.

The study is devoted to the embetterment of Hadfield steel making technological process using remelting method. The purpose of the work is to increase the metal refining effectiveness and its properties, to decrease the net price of steel, to expand nomenclature of the castings produced by the remelting method. Moreover, such tasks as manganese fugacity reduction, increase of diffusive steel deoxidation efficiency, energy and high-cost materials savings are implemented during the work. Three directions for the efficiency improvement are used: early slag melting, the efficiency of diffusive deoxidation increase, and off-furnace metal treatment. Newly designed fine materials by LLC "Metallurg" Smolensk regional office Russian Association of Foundrymen are used during all the work stages.

**Keywords:** high-manganese steel; electric arc furnace; smelting technology; diffusion deoxidation; slag mode.

Введение. Снижение себестоимости продукции, повышение механических и эксплуатационных свойств отливок из углеродистой и легированных сталей — актуальные задачи предприятий в связи с возрастающей конкуренцией за рынки сбыта продукции [1]. Эти задачи решали в АО "Оскольский завод металлургического машиностроения" (АО "ОЗММ") при выплавке стали 110Г13Л совместно со специалистами завода.

Высокомарганцевая сталь обладает уникальным комплексом свойств, позволяющим изготовлять из нее конструктивно сложные отливки, эксплуатирующиеся в условиях больших динамических и циклических нагрузок, интенсивного износа [2]. В АО "ОЗММ" выплавляют сталь 110Г13Л для отливок 1-й и 2-й групп (табл. 1) методом окисления и переплава. Последний метод наиболее экономичный, так как после расплавления шихты шлак, как

С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	
	IVITI		Не более				
1-я группа отливок							
0,91,1	11,513	0,30,7	0,5	0,07	0,07	1,0	
2-я группа отливок							
0,91,4	11,515	0,31,0	0,05	0,12	1,0	1,0	

1. Химический состав, % мас., стали 110Г13Л 1-й и 2-й групп отливок

правило, не скачивают, а сразу приступают к проведению восстановительного периода. В результате при выплавке стали методом переплава по сравнению с окислительной плавкой за счет отсутствия окислительного периода сокращается расход легирующих добавок, электроэнергии на 12...15 %, повышается производительность печи на 15...20 % [3].

При плавке методом переплава отходов в шихте используют чистый плотный амортизационный лом этой марки стали (зубья экскаваторов, стрелочные переводы, траки и др.), но чаще всего применяют собственный возврат: прибыли, литники, сливы, скрап и т.п. Восстановительный период проводят под шлаком периода плавления. Для восстановления оксидов марганца и железа на шлак присаживали известь, плавиковый шпат и молотый ферросилиций ФС65 в количестве 6,5 кг/т годного. Помол ферросилиция осуществляли в чашевой бегунковой мельнице, в которой реализован принцип измельчения ферросилиция с помощью раздавливания и истирания между катками (бегунками) и поверхностью чаши. Процесс помола отличают высокая трудоемкость, обильное пылевыделение и взрывоопасность.

Требуемое суммарное содержание МпО и FeO (<5 %) [4] в предвыпускном шлаке получали увеличением продолжительности восстановительного периода плавки и повышением интенсивности обработки шлака раскислительной смесью. Но это зачастую не обеспечивало требуемого восстановления марганца и железа из шлака. В результате снизились уровень механических свойств, обусловленный требованиями технических условий на отливки из стали 110Г13Л, и жидкотекучесть стали, что увеличивало количество брака вследствие образования дефектов горячая трещина и спай при одновременном увеличении затрат на производство. Поэтому метод переплава использовали для получения отливок 1-й группы. Для изготовления ответственного литья применяли плавку с окислением примесей. Для повышения механических свойств стали 110Г13Л рекомендуют проводить легирование [5], модифицирование расплава [6, 7], однако это существенно повышает себестоимость стали.

*Цель работы* — совершенствование технологического процесса плавки стали 110Г13Л методом переплава для повышения эффективности рафинирования металла и свойств, снижения себестоимости стали, расширения номенклатуры отливок, выплавляемых методом переплава.

Для решения задач снижения угара марганца, повышения эффективности диффузионного раскисления стали, экономии электроэнергии и дорогостоящих материалов применены три направления совершенствования выплавки стали методом переплава.

Методика проведения исследований. Материалом для исследований служила сталь 110Г13Л, выплавленная в электродуговой печи ДСП 6 с основной футеровкой методом переплава. Для раннего наведения шлака во время плавления шихты на подину загружали 150 кг извести и по ее поверхности равномерно распределяли флюс разжижитель шлака (РШ) в количестве 5 кг/т жидкого, что обеспечивало снижение угара марганца, уменьшение времени плавления материалов и экономию электроэнергии.

Основу РШ составляет глиноземсодержащий материал, который снижает температуру плавления основных шлаков. Для повышения основности шлака в РШ добавляли кальцийстронциевый карбонат. Для более существенного снижения температуры плавления в состав РШ введены оксиды калия и натрия, а также плавикошпатовый концентрат. Отличительной особенностью РШ является высокая дисперсность, что также снижает температуру плавления шлака. Флюс РШ расширяет

временной и температурный интервал разжижающей способности плавикового шпата.

В восстановительный период плавки проводили диффузионное раскисление расплава и доводили металл по химическому составу. Диффузионное раскисление в печи осуществляли до получения белого или светло-серого шлака раскислителем диффузионным алюмосодержащим (РДА) после увеличения основности шлака (B=2) добавками извести. Затем выполняли слив стали в разогретый до температуры 500 °C ковш вместе со шлаком. Причем большую часть шлака сливали в начальный период.

В ковше проводили окончательное раскисление стали алюминием. Расход алюминия был снижен на 50 % от обычного и составил 0,5 кг/ т жидкого. Дополнительно осуществляли внепечную обработку расплава рафинирующей смесью алюмосодержащей (РСА) в количестве 5 кг/т жидкого. Особенностью смеси РСА является то, что она изготовлена на основе системы оксидов СаО-А12О3-Na2O-СаБ2 и карбонатов CaCO<sub>3</sub> и SrCO<sub>3</sub>. Смесь характеризуют отсутствием гидратации и сепарации, а также большей скоростью формирования шлаковой фазы. РСА представляет собой усовершенствованный синтетический шлак с высокой основностью и низкой окисленностью. с низкими температурой плавления, вязкостью и поверхностным натяжением. Это позволяет образующимся в процессе выпуска металла каплям РСА аккумулировать оксиды марганца, железа, алюминия и сульфиды, очищая металл, а также дегазируя его, повышая таким образом его механические свойства.

Химический состав стали 110Г13Л определяли на оптико-эмиссионном спектрометре FOUNDRY-MASTER. В качестве образцов использовали пробы, залитые ложкой в металлический кокиль. Шлаки отбирали ложкой в печи и выливали на металлическую плиту. Качество шлаков анализировали визуально и химическими методами. Заготовки образцов для определения физико-механических свойств сталей получали заливкой в сухие стержневые формы пробных брусков по ГОСТ 977—88. Микроструктуру в литом и термообработанном состояниях изучали на микрошлифах, изготовленных из остатков образцов, на микроскопе типа МЕТАМ — ВВ.

Применяли статистическую обработку результатов исследований с использовани-

ем компьютерной программы STATISTICS & ANALISIS. Уровень значимости для расчетов приняли равным 0,05 [8]. Определяли средние арифметические значения химического состава металла, а также показатели вариаций средних величин, характеризующих их стабильность. Чем меньше вариации колеблются вокруг средней, тем она более надежна. О стабильности свойств судили по величине вариаций. Наиболее наглядно характеризует однородность свойств коэффициент вариации, так как показывает относительную меру колебаний признака. Последний рассчитывали как отношение среднего квадратичного отклонения к среднему арифметическому значению химического состава.

Описание процесса. Первое направление совершенствования технологического процесса заключалось в организации раннего наведения шлака во время плавления шихты, что обеспечивало снижение угара марганца, уменьшение времени плавления материалов и экономию электроэнергии. Для этого на подину загружали 150 кг извести и по ее поверхности равномерно распределяли флюс РШ в количестве 5 кг/т жидкого.

В процессе расплавления шихты в прорезаемых колодцах под электродами из легкоплавкого флюса РШ и извести достаточно быстро формируется жидкоподвижный шлак. Наведенный шлак экранирует дуги в колодцах и хорошо защищает от угара первые порции жидкого металла [9]. Экранирование дуг в колодцах жидкоподвижным шлаком способствует также снижению теплопотерь, быстрому нагреву шлака и металла и, соответственно, уменьшению времени плавления шихты и экономии электроэнергии.

Второе направление совершенствования технологии заключалось в более эффективном диффузионном раскислении стали. Взамен молотого ферросилиция ФС65, используемого на заводе, применяли РДА в количестве 3 кг на 1 т жидкой стали. РДА представляет собой смесь порошков углерод-, кремний- и алюмосодержащих материалов. Основное отличие порошков заключается в том, что они получены физико-химическим путем и обладают высокой дисперсностью, что придает смеси новые свойства [10]. Кроме того, в состав смеси введено оптимальное количество поверхностноактивных веществ, состоящих из кальцийстронциевого карбоната, соединений калия

и натрия, которые придают ей жидкоподвижность и еще больше активизируют [11].

Основная и важнейшая особенность дисперсного состояния заключается в том, что значительная доля свободной энергии системы сосредоточена в межфазных поверхностных слоях. Избыток свободной энергии делает дисперсные системы термодинамически неустойчивыми. Для них характерны самопроизвольные процессы, стремящиеся снизить этот избыток различными путями. Таким образом, избыток свободной энергии будет потрачен на изменение химического состояния вещества, т.е. на увеличение реакционной способности или физико-химической активности компонентов, а следовательно, и на кинетические характеристики реакций раскисления.

Задачу раскисления и десульфурации стали решали при проведении восстановительного периода плавки. Отличительной особенностью диффузионного раскисления является участие шлаковой фазы в металлургических процессах восстановления оксидов. Первоочередная задача заключается в связывании серы и восстановлении оксидов железа и марганца в шлаке [2]. Диффузионное раскисление основано на принципах закона распределения Нернста [15], согласно которому соотношение концентраций вещества, растворенного в двух смежных несмешивающихся жидкостях, для данных температур и давлений является постоянной величиной:

$$L = [FeO]/(FeO) = const;$$
 (1)

$$L = [FeS]/(FeS) = const,$$
 (2)

где [FeO], [FeS] — концентрации оксидов и сульфидов железа в стали; (FeO), (FeS) — концентрации оксидов и сульфидов железа в шлаке.

Если уменьшить концентрации оксидов в шлаке, то начнется диффузионный переход кислорода и серы из металла в шлак, т.е. рафинирование металла. В связи с этим проведены работы по испытанию и внедрению РДА для сталей взамен молотого ферросилиция ФС65.

При подаче РДА на шлак дисперсные компоненты смеси способствуют равномерному распределению материала по поверхности шлака за короткий промежуток времени. Карбонаты кальция и стронция, входящие в состав смеси, мгновенно диссоциируют на CaO, SrO и CO<sub>2</sub>. Оксиды Ca и Sr повышают основность и сульфидоемкость шлака. CO<sub>2</sub> способствует перемешиванию РДА со шлаком. Входящие в со-

став РДА соединения натрия, калия и оксиды алюминия способствуют разжижению шлака и делают его реакционноспособным. Кроме того, дисперсный углеродсодержащий материал дополнительно вспенивает шлак за счет протекания реакции восстановления оксидов из шлака по реакциям:

$$2(\text{FeO}) + (\text{C}) = 2[\text{Fe}] \downarrow + \{\text{CO}_2\} \uparrow;$$
 (3)

$$2(MnO) + (C) = 2[Mn] \downarrow + \{CO_2\} \uparrow.$$
 (4)

Вспененный жидкоподвижный шлак экранирует дуги, способствует быстрому нагреванию шлака и металла [14]. В результате создаются идеальные условия для дальнейшего протекания реакций десульфурации и восстановления оксидов железа и марганца из шлака присутствующими в РДА алюминием и кремнием:

$$(FeS) + (CaO) = (CaS) + (FeO);$$
 (5)

$$3(\text{FeO}) + 2(\text{Al}) = 3[\text{Fe}] \downarrow + (\text{Al}_2\text{O}_3);$$
 (6)

$$3(MnO) + 2(Al) = 3[Mn] \downarrow + (Al_2O_3).$$
 (7)

Таким образом, сокращается время восстановительного периода, экономится электроэнергия. Образующийся  $Al_2O_3$  продолжает разжижать шлаки и повышать их основность. В результате раскисления оксиды железа и марганца восстанавливаются в шлаке и согласно закону распределения переходят в металл, а из металла в шлак уходят FeO и MnO, где восстанавливаются смесью РДА. Сульфиды также переходят в шлак согласно закону распределения. Сталь оказывается с более низкими содержаниями оксидов и серы. За счет уменьшения в стали неметаллических включений и оксидных плен возрастают механические свойства и жидкотекучесть расплава.

Восстановление FeO из шлака имеет немаловажное значение, так как оксид марганца растворяет в себе FeO и создает прочные конгломераты, которые трудно растворяются и с трудом уходят с границ зерен при термической обработке. Чем меньше FeO в шлаке, тем тоньше границы зерен и выше механические свойства. Поэтому при анализе шлаков желательно определять и контролировать количество FeO.

Третье направление совершенствования технологического процесса — внепечная обработка расплава в ковше PCA, обеспечивающая дальнейшее очищение металла от оксидов марганца и железа, а также сульфидов и других неметал-

лических включений. Это приводит к повышению механических свойств стали, что очень важно для метода переплава. Таким образом, задача внепечной обработки — частично заменить окислительный период и устранить объективные недоработки восстановительного периода.

Выпуск стали из печи проводили совместно со шлаком. Интенсивное перемешивание металла со шлаком в ковше обеспечивало снижение MnO и FeO и дополнительное рафинирование — из металла в белый шлак переходили сера и неметаллические включения. Дополнительная обработка стали РСА в ковше интенсифицировала рафинирование металла. В процессе обработки стали РСА неметаллические включения укрупняются и всплывают на зеркало металла в ковше за счет разности плотностей включений и самого металла. В процессе диссоциации карбонатов образуются пузырьки СО, которые, поднимаясь вверх в объеме расплава, увлекают за собой неметаллические включения и газы [11]. При комплексной обработке расплава в ковше происходит одновременное модифицирование включений с последующей флотацией их пузырьками на зеркало металла [13].

Обсуждение результатов исследований. По первому направлению совершенствования технологии провели плавки по существующей технологии и с ранним наведением шлака. Анализировали плавки, в которых использовали шихту, состоящую из 100 % собственного неочищенного возврата. После расплавления такой шихты образуется большое количество шлака с низкой основностью, так как оксид кремния неочищенного от формовочной смеси возврата создает основную массу шлака.

В рядовых плавках на дно печи загружали 150 кг извести. В экспериментальных плавках на подину загружали 150 кг извести и по ее поверхности равномерно распределяли флюс РШ в количестве 45 кг. Затем загружали шихту. Плавление шло в штатном режиме. Однако в плавках с РШ в колодцах, прорезаемых электродами, раньше появлялся шлак. Наведенный шлак экранировал дуги в колодцах, о чем

свидетельствовала стабилизация горения дуг, которое характеризовалось равномерным и тихим гудением. [11]. Экранирование дуг в колодцах жидкоподвижным шлаком способствовало быстрому нагреванию шлака и металла, снижению тепловых потерь и, соответственно, уменьшению времени плавления шихты и экономии электроэнергии. Сравнительные результаты наличия МпО и FeO в шлаках, марганца в металле, а также время плавления шихты приведены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, раннее наведение шлака позволяет снизить угар марганца и железа, а также время плавления шихты, что подтверждает теоретические выкладки. Расчеты показали, что при мощности трансформатора 5 МВт и цене электроэнергии 3,96 руб./кВт·ч во время периода плавления на каждой плавке экономится 3300 руб. Кроме того, угорает на 40...45 кг меньше чистого марганца.

После небольших простоев печи (до 25 мин) шлак покрывался корочкой, однако оставался жидкоподвижным, чему способствовало применение РШ. После длительных простоев печи (до 2,5 ч) в связи с неготовностью ковша, отсутствием форм шлак окончательно не загустел и быстро приводился в жидкоподвижное состояние (значительно быстрей, чем при работе без РШ с плавиковым шпатом), что позволяло без проблем сливать содержимое печи без остатка. Это тоже позволяло экономить электроэнергию. Таким образом, РШ эффективно создает условия для благоприятного шлакового режима.

Шлаки и в том и в другом случаях были черного цвета, в том числе и в изломе (рис. 1), что свидетельствовало о большом количестве в них MnO и FeO при обоих вариантах плавления. Такие шлаки требуют интенсивного диффузионного раскисления.

На качество металла оказывает решающее значение восстановительный период плавки. Велико влияние шлаков на конечный результат плавки. Они должны быть высокоосновными и рассыпающимися в белый порошок с содержанием в сумме FeO и MnO ≤ 5 %. Чем меньше оксидов железа и марганца в шлаке, тем меньше их будет и в металле [2].

### 2. Сравнительные показатели периода плавления

	Химический с	Время			
Вариант плавления	Ш.	лак	Металл	плавления,	
	MnO	FeO	Mn	мин	
По рядовой технологии	33	2,3	11,8	45	
С ранним наведением шлака	27	1,92	12,3	35	







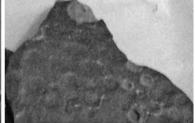


Рис. 2. Шлак после диффузионного раскисления РДА

Диффузионное раскисление проводили раскислительной смесью РДА. Перед раскислением на шлак присаживали до 300 кг извести для поднятия основности шлака. После расплавления извести начинали диффузионное раскисление. Рациональную присадку РДА определили экспериментально: 4 кг на 1 т жидкой стали, т.е. 12 пакетов по 3 кг на одну плавку. РДА присаживали порционно в три приема по четыре пакета. По окончании реакции от предыдущей подачи присаживали следующую порцию. После присадки РДА смесь мгновенно расходилась по поверхности шлака и происходило интенсивное раскисление и разжижение шлака, сопровождающееся его вспениванием, о чем свидетельствовала стабилизация горения дуг, которое характеризовали равномерное и тихое гудение. При использовании молотого ферросилиция ФС65 он ложился на шлак локально и практически не расходился. Для эффективного раскисления необходимо было вручную равномерно распределить его по периметру печи. После присадок РДА визуально шлак был жидкоподвижным, равномерно распределенным и реакционноспособным. После окончания обработки шлаков РДА проводили отбор проб шлака на анализ. Шлак значительно посветлел в изломе (рис. 2), что свидетельствовало о восстановлении оксидов марганца и железа.

После диффузионного раскисления содержание MnO в шлаках уменьшилось до 11...16 %, FeO — до 0,8...0,9 %. При раскислении смесью с ферросилицием содержание MnO составляло 15...19 %, а FeO — более 1 %.

Таким образом, РДА оказался технологичнее молотого ФС65 и существенно дешевле. Вместе с тем концентрации оксида марганца в шлаке все же оставались недопустимо высокими. Одной из причин этого являлась невозможность достижения требуемой основности шлака, о чем свидетельствует зеленоватый оттенок излома и нерассыпчатость шлака. Для дальнейшего повышения качества металла, его

дегазации и удаления неметаллических включений провели внепечную обработку расплава.

На дно ковша загружали 45 кг (3 мешка) РСА. При этом в ковш отдавали на 5 кг меньше алюминия за счет наличия его в РСА, что обеспечивало экономию алюминия. РСА образует легкоплавкий, жидкоподвижный, высокоосновный шлак, активизирует процесс рафинирования расплава от неметаллических включений и способствует восстановлению марганца из металла и шлака. Это подтверждается тем, что в анализируемых плавках отмечены угар кремния и углерода и, напротив, существенный пригар марганца (табл. 3, 4).

Как видно из данных табл. 3, 4, в рядовых плавках без ковшовой обработки содержание углерода, кремния и марганца в печи и в ковше практически не изменялось. После обработки расплава в ковше PCA отмечены угар углерода, кремния и существенный пригар марганца. В таблицах приведены результаты шести плавок, но такая тенденция характерна для всех плавок. Таким образом, PCA, образуя легкоплавкий, жидкоподвижный, высокоосновный шлак, активизирует процесс рафинирования металла от неметаллических включений и вовлекает кремний и углерод металла в процесс восстановления оксида марганца, т.е. отмечается тенденция к экономии марганца.

Об эффективности РСА можно косвенно судить по пробе шлака из ковша (рис. 3). Шлак стал существенно светлее. Это свидетельствует о том, что количество FeO в шлаке снизилось.

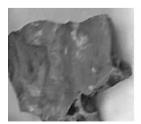




Рис. 3. Шлак после ковшовой обработки

Номер плавки	Место отбора проб	С	Si	Mn	P	Cr	Ni	Al
41416	Печь	1,13	0,51	13,6	0,064	0,88	0,21	0,03
41410	Ковш	1,13	0,53	13,7	0,066	0,87	0,20	0,032
41395	Печь	1,11	0,78	11,9	0,058	0,66	0,32	0,0075
41393	Ковш	1,08	0,77	11,8	0,053	0,67	0,32	0,0065
41402	Печь	1,06	0,55	13,3	0,050	0,75	0,20	0,0065
41403	Ковш	1,08	0,57	13,3	0,56	0,75	0,21	0,04

#### 4. Химический состав, % мас., металла в печи перед выпуском и в ковше после обработки РСА

Номер плавки	Место отбора проб	С	Si	Mn	Р	Cr	Ni	Al
41417	Печь	1,05	0,35	12,3	0,055	1,01	0,18	_
41417	Ковш	1,03	0,27	13,5	0,062	1,03	0,18	0,13
41424	Печь	1,15	0,42	12,0	0,056	1,13	0,20	0,008
41424	Ковш	1,12	0,31	12,7	0,061	1,13	0,20	0,04
41444	Печь	1,13	0,30	11,4	0,063	0,72	0,15	0,006
41444	Ковш	1,12	0,27	13,1	0,070	0,70	0,15	0,033

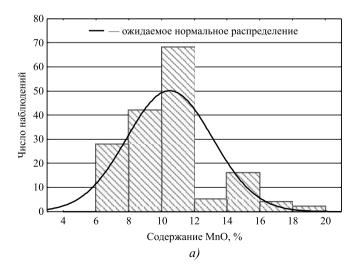
### 5. Результаты статистической обработки химических составов шлаков

Компонент	Число	Содержание, %				Среднее	Коэффициент	
шлака	наблюдений	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия	квадратичное отклонение	вариации	
FeO	165	0,78909	0,600000	1,10000	0,015124	0,122980	15,58507	
MnO	103	10,49879	6,200000	19,50000	6,898901	2,626576	25,01790	

После внедрения новой технологии плавки методом переплава провели статистическую обработку химических составов шлаков 165 плавок. Для снижения трудоемкости исследований анализировали концентрации MnO и FeO в шлаках, являющиеся одним из основных индикаторов качества металла. Результаты статистической об-

работки представлены в табл. 5 и наглядно представлены гистограммами на рис. 4.

Как видно из данных табл. 5, содержание FeO в шлаках более стабильно и предпочтительнее, так как большинство их значений ≤1 %. Содержание MnO в шлаках менее стабильно, 22 % шлаков содержат концентрации



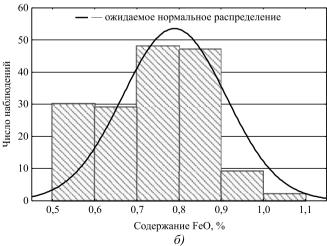


Рис. 4. Гистограмма распределения MnO (a) и FeO (б) в шлаках

оксидов более 12 %. В основном это плавки с неблагоприятной собственной шихтой из неочищенного возврата.

Химический состав плавок соответствовал требованиям ГОСТ. Микроструктура и механические свойства стали отвечали требованиям НТД на отливки.

Внедрение новой технологии выплавки марганцевой стали позволило существенно повысить качество металла, выплавленного методом переплава, расширить номенклатуру отливок, выплавляемых этим методом, и получить годовой экономический эффект свыше 3 млн руб.

Результаты работы успешно применяют также в АО "Рубцовский филиал "Алтайвагон".

#### Выводы

- 1. Разработана новая технология плавки высокомарганцевой стали 110Г13Л методом переплава с помощью новых материалов производства ООО "Металлург" СРО РАЛ для раннего наведения шлака с помощью РШ, замены молотого ферросилиция ФС65 на дисперсный раскислитель РДА во время диффузионного раскисления стали и внепечной обработки расплава рафинирующей смесью РСА.
  - 2. Новая технология обеспечила:
    - сокращение времени наведения шлакового покрова;
    - сокращение времени расплавления шихты;
    - уменьшение расхода электроэнергии;
    - повышение эффективности диффузионого раскисления и снижение затрат на него;
    - снижение расхода марганецсодержащих ферросплавов.
- 3. Повышено качество высокомарганцевой стали и расширена номенклатура отливок, выплавляемых методом переплава.
- 4. Экономический эффект от внедрения технологии составил более 3 млн руб.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Дибров И.А.** Состояние и перспективные направления развития литейного производства России // Труды XII съезда литейщиков России. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. 520 с.
- 2. **Выплавка** высокомарганцовистой стали в дуговой сталеплавильной печи. Технология. Сообщение 1 / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Е.В. Синицкий, Д.А. Горленко, Н.А. Дуров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 10. С. 735—739.

- 3. **Давыдов Н.Г.** Высокомарганцовистая сталь. М.: Металлургия, 1979, 176 с.
- 4. **Исследование** возможности повышения надежности литых крупногабаритных изделий для горного оборудования / Т.Р. Гильманшина, Д.Ю. Крицкий, С.И. Тюрин и др. // Интернет-журнал "Науковедение". 2017. Т. 9. № 2. http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN217. pdf.
- 5. Chena C., Zhang F., Wang F. et al. Effect of N + Cr alloying on the microstructures and tensile properties of Hadfield steel // Materials Science & Engineering. 2017. 679. P. 95—103.
- 6. **Chen C., Bo L., Fenga X. et al.** Strain hardening and nanocrystallization behaviors in Hadfield steel subjected to surface severe plastic deformation // Materials Science & Engineering. 2018. 729. P. 178—184.
- 7. **Mohamed K.** Ladle-treated high manganese steel reinforced by Cr7C3 phase // International journal of cast metals research. 2017. Vol. 30. Iss. 2. P. 81—86.
- 8. **Сидняев Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Юрайт, 2014. 495 с.
- 9. **Совершенствование** технологии выплавки стали 110Г13Л / Гребнев Ю.В., Габельченко Н.И., Хмуров И.А. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 9. Вып. 9. С. 129—132.
- 10. **Сранительный** анализ качественных показателей стали 110Г13Л, выплавленных с применением различных модификаторов и раскислительных смесей / В.А. Чайкин, А.В. Чайкин, В.С. Лозов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 1. С. 19—25.
- 11. **Новый** материал для диффузионного раскисления в агрегате комплексной обработки сталей / В.А. Чайкин, А.В. Чайкин, А.Д. Касимгазинов, П.О. Быков // Черные металлы. 2018. № 9. С. 6—11.
- 12. **Выплавка** высокомарганцовистой стали в дуговой сталеплавильной печи. Технология. Сообщение 2 / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Е.В. Синицкий, Д.А. Горленко, Н.А. Дуров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 1. С. 23—28.
- 13. **Mechanisms** of cast structure and stressed state formation in Hadfield steel / D. Gorlenko, K. Vdovin, N. Feoktistov // Overseas Foundry. November 2016. Vol. 13. Iss. 6. P. 433—442.
- 14. **Кожухов А.А.** Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при плавке под вспененным шлаком в современных ДСП // Электрометаллургия. 2015. № 6. С. 3—9.
- 15. **Технологические** процессы производства стали: учебник / В.А. Кудрин, В.А. Шишимиров. Ростов н/Д.: Феникс, 2017. 302 с.

Владислав Васильевич Колпаков; Андрей Владимирович Чайкин, канд. техн. наук; Владимир Андреевич Чайкин, д-р техн. наук, sro\_ral@mail.ru;

Константин Николаевич Вдовин, д-р техн. наук

УДК 621.791.052:669.017.3

В.П. Морозов, Ю.Г. Романов

(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

# Влияние влаги, содержащейся в порошке, на сопротивляемость образованию горячих трещин при лазерной наплавке

Лазерную наплавку для восстановления рабочих поверхностей различных деталей машиностроения широко применяют в многочисленных направлениях реновации. Установлено, что повысить ресурс работы восстановленного изделия в несколько раз по сравнению с новой деталью возможно, применяя процесс наплавки металла лазерным лучом износостойких порошковых материалов системы Ni—Cr—B—Si. Исследовано возникновение трещин в поверхностных наплавленных слоях, которое может усиливаться в случае адсорбирования влаги на поверхности порошка. Рассмотрена и выявлена область влияния составляющих компонент влажности на технологическую прочность наплавленного металла.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка; восстановление деталей машиностроения; порошковые материалы системы Ni—Cr—B—Si.

Laser surfacing for reconditioning of the working surfaces of various engineering parts is widely used in numerous areas of renovation. It is established that it is possible to increase the service life of the restored product several times in comparison with the new part using the laser beam welding process of wear-resistant Ni—Cr—B—Si powder materials. The occurrence of cracks in the surface deposited layers, which may increase in case of moisture adsorption on the surface of the powder, is studied. The area of influence of the moisture component on the technological strength of the deposited metal is considered and revealed.

Keywords: laser surfacing; reconditioning of engineering parts; powder materials of Ni-Cr-B-Si system.

**Введение.** Порошки, используемые в процессах наплавки, представляют собой сильно гигроскопичный материал с развитой поверхностью, интенсивно поглощающей влагу из атмосферы, адсорбируя ее.

Как известно, влага является источником водорода и кислорода, которые оказывают отрицательное влияние на образование горячих трещин в процессе наплавки и сварки.

В работе [1] сделан вывод о том, что водород не вызывает горячие трещины в металле или стали типа 18-8, однако способен уситрещинообразование, вызываемое другими элементами. В данном случае авторы предполагают, что водород диффундирует в уже образовавшиеся горячие трещины и при снижении температуры его атомы ассоциируют в молекулы, увеличивая давление внутри микротрещин. Водород, снижая поверхностную энергию границ кристаллитов и усиливая ликвацию других элементов, способствует повышению склонности металла наплавки к образованию горячих трещин в случае плоской или линейной схемы кристаллизации [2].

По данным [3, 4], водород, диффундируя с одинаковой скоростью по телу зерна и межкристаллическим прослойкам, не оказывает более заметного влияния на прочность последних. Кислород воздуха расширяет зону межкристаллического разрушения, снижая пластические свойства металла [4]. Окисление ферритизаторов (Сr, Si), вызванное присутствием кислорода, способствует получению чисто аустенитной структуры, более склонной к образованию горячих трещин [1].

Увеличение влажности исходного состояния материала покрытий, электродов, флюсов, газовой атмосферы приводит к повышению содержания остаточного [3] и диффузионноподвижного водорода [5] в наплавленном металле.

Главным источником попадания водорода в Fe, Ni, Al, Cu и другие металлы, являются исходные шихтовые материалы, применяемые при технологических операциях их получения и обработки.

Исследование свойств порошков системы Ni—Cr—B—Si. Известно, что наличие водо-

Пополуму	Способ	Размер	Co,	Источник			
Порошок	получения	частиц, мм	[O]	[H]	[N]	литературы	
	Распыление водой		0,057	0,003	0,081	[11]	
ПГ-ХН80СР3ОМ	Распыление азотом	0,3150,4	0,096	0,005	0,089	[12]	
III-AH80CP3OM	Распыление аргоном		0,074	0,004	0,085	[11]	
	Распыление воздухом		0,160	0,003	0,086		
СНГН-1	Термическая сфероидизация	0,1	0,181	0,007	0,112	[11]	
CHI H-I		0,160,2	0,056	0,005	0,076		
ЭП-616А	Распыление аргоном	0,250,3	0,012	_	_	[4]	
ЭП-616В		0,1	0,0385	_	_	[9]	

1. Содержание количества газов в металле порошка в зависимости от способа его получения

рода в порошке обусловлено, во-первых, контактом расплава с водой в процессе получения порошков при распылении, во-вторых, поглощением влаги из атмосферы за счет адсорбции на поверхности порошинок.

В металлах водород может находиться в следующих четырех различных состояниях [6]:

- 1) в виде твердых растворов внедрения, находясь частично в атомарном и ионизированном состоянии;
- 2) в молекулярной форме, выделяясь из твердого раствора и рекомбинируя в трещинах, порах и других несплошностях;
- 3) в кристаллической решетке, взаимодействуя с примесями металлов. При взаимодействии с кислородом, например в Си и Ni при повышенных температурах, образуются пары воды. Эти новые газообразные продукты выделяются в больших порах и других несплошностях (преимущественно по границам зерен) и создают в них высокое давление;
- 4) в виде химических соединений с металлом растворителя, называемых гидридами, которые образуются в процессе охлаждения вследствие резкого уменьшения растворимости водорода в металле, выпадая чаще всего в виде тонких пластин вдоль плоскостей скольжения и по границам зерен [7].

Порошки типа ПГ-XH80CP2—ПГ-XH80CP4 (ПГ-CP2—ПГ-CP4), широко применяемые при лазерной и электродуговой наплавке, изготовляют путем распадения (грануляции) струи жидкого расплава соосной конической струей воды или сжатого газа ( $N_2$ , Ar) и последующего охлаждения водой. Материал при распылении охлаждается со скоростями  $10^4...10^6$  °C/c [8].

В зависимости от способа получения порошки системы Ni—Cr—B—Si могут растворять кроме водорода и другие газы — [O], [N] (табл. 1), количество которых зависит от размера получаемых частиц [9] и содержания газа в распыляющей атмосфере (табл. 2, рис. 1) [9, 10].

Основными источниками водорода при наплавке самофлюсующихся порошков системы Ni—Cr—B—Si является флюс — шлак и атмосфера. В процессе плавления и образования ванны расплава (впоследствии валика) порошок, нагреваясь до высокой температуры, теряет содержащуюся в нем влагу в виде паров. Если бы нагрев шел достаточно медленно, то эти пары воды выделились бы раньше, чем начался процесс плавления металла.

Однако разогрев при лазерной наплавке идет быстро ( $W_{\rm H}=10^5\,{}^{\circ}{\rm C/c}$ ), поэтому часть незакончившихся процессов дегидрации завершается в зоне наплавки, обогащая атмосферу взаимодействия лазерного излучения с расплавом металла водородом в жидком состоя-

### 2. Содержание кислорода в металле порошка ПГ-СРЗ в зависимости от среды распыления и охлаждения [11]

Ср	еда	Размер	Содержание [О] в порошке, %	
распыления	охлаждения	частиц $D$ , мм		
Вода			0,129	
Азот	Родо		0,10	
Аргон	Вода	0,160,2	0,074	
Воздух			0,210	
Азот	Азот		0,01	

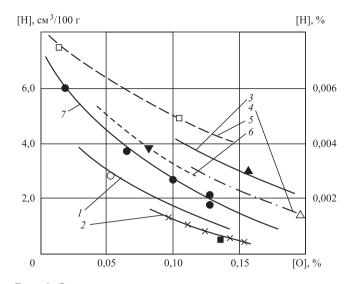


Рис. 1. Зависимость содержания водорода от количества кислорода, растворенных в металле порошка ПГ-СР3:

 $I,\ 2$  — распыление водой;  $3,\ 4$  — распыление воздухом; 5 — распыление азотом; 6 — распыление аргоном; 7 — [11];  $I,\ 3$  — D = 0,4 мм;  $2,\ 4$ —6 — D = 0,2 мм

нии за счет разложения поступающих паров воды.

Вторым источником попадания водорода в металл наплавки является атмосфера.

Воду, содержащуюся в порошках, можно разделить на ряд видов, характеризующихся различной энергией связи с оксидами и химическими соединениями, входящими в состав порошка [13]. Поэтому условия, необходимые для удаления воды, различны.

Адсорбированная или гигроскопическая влага обладает относительно малой энергией связи с поверхностью твердого тела вследствие того, что процесс адсорбции — бездиффузионный.

Кристаллизационная вода входит в структуру кристаллов ряда химических соединений и для ее удаления требуются значительные затраты энергии на разрушение и перестройку кристаллов (кристаллогидратов), что происходит для большинства из них при нагревании до температуры 200...400 °C [13].

Конституционная вода входит в состав соединений и для ее удаления требуется затратить большее количество энергии, соответствующей энергии химических связей. Так, гидраты оксидов щелочных металлов типа  $H_4SiO_4(SiO_2 \cdot 2H_2O)$  и  $H_2SiO_3(SiO_2 \cdot H_2O)$ , входящих в состав порошков системы Ni-Cr-B-Si, очень прочны и для их разложения необходим нагрев до температур 1000 °C [13].

Методика определения влажности исходного состава порошков системы Ni—Cr—B—Si. Влияние влажности исходного состава порошка ПГ-XH80СР3ОМ на образование трещин определяли по следующей методике. Перед лазерной наплавкой порошок определенного объема (27 см³) специально увлажняли, после чего помещали в печь с температурой 350...400 °C, где выдерживали от 10 до 60 мин. В зависимости от этого содержание влаги изменялось. Затем выполняли непрерывную лазерную наплавку на соответствующих режимах на фаску клапана (в виде круговой пробы).

В качестве образца пробы, наиболее полно отражающей условия наплавки в реальном изделии и обладающей большой жесткостью, использовали клапан двигателя из стали 40X10C2M, на фаску которого по винтовой линии наплавляли слой определенной, одинаковой для всех вариантов ширины. Такая форма пробы обеспечивает асимметричное поле остаточных пластических деформаций, а также действительную картину временных напряжений и деформаций в процессе наплавки, так как клапан является реальным изделием, подлежащим восстановлению.

За показатель технологической прочности принят коэффициент трещинообразования  $K_{\rm H}$ , представляющий отношение количества образующихся трещин в слое к длине этого слоя наплавки.

Для обнаружения трещин применяли инструментальный микроскоп МИМ-2 при увеличении 5.

Наплавку слоя осуществляли с помощью излучения непрерывного  $CO_2$ -лазера ЛТ-1.2 [14] мощностью до 5 кВт. Режим процесса выбирали из условия качественного формирования наплавленного слоя с учетом обеспечения высоких адгезионных свойств [15] и повышенной износостойкости покрытия [16].

При данном режиме получена высота слоя  $0.2 \cdot 10^{-3}$  м при ширине  $8 \cdot 10^{-3}$  м, перекрытие валиков из условия равномерности высоты составляет 75 % (при ширине единичного валика  $3 \cdot 10^{-3}$  м).

Порошок подавался в зону действия лазерного луча специальным разработанным устройством, позволяющим осуществлять плавную и дискретную регулировку массового расхода.

В качестве наплавляемого сплава использовали порошки типа ПГ-СР не только разных

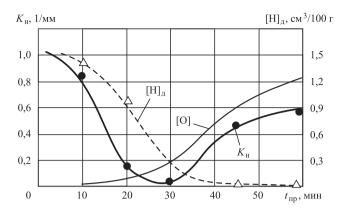


Рис. 2. Зависимости показателя технологической прочности  $K_{\rm H}$ , содержания диффузионно-подвижного водорода [H]<sub>д</sub> и кислорода [O], растворенных в металле наплавки, от времени прокалки в печи  $t_{\rm nn}$ 

марок (ПГ-СР2 и ПГ-СР3), но также и различных поставок одной марки (ПГ-СР2 1-й и 2-й поставки). Различие в поставках порошка соответствует разным выплавкам при изготовлении.

Полученные результаты представляют собой зависимость показателя технологической прочности от времени прокалки порошка, которая имеет сложный вид с ярко выраженным минимумом (рис. 2).

С увеличением времени прокалки порошка от 10 до 30 мин значение коэффициента  $K_{\rm H}$  снижается с 0,83 до 0,03 мм $^{-1}$ . Дальнейшее повышение времени прокалки от 30 до 60 мин приводит к росту  $K_{\rm H}$  от 0,03 до 0,57 мм $^{-1}$ . Такой характер изменения зависимости  $K_{\rm H} = f(t_{\rm np})$ , по мнению авторов статьи, определяется взаимодействием двух факторов: влиянием адсорбированной на поверхности порошка влаги и газовых составляющих [H], [O], [N], растворенных в металле порошка, а также процессами окисления.

Увеличение времени выдержки увлажненного порошка в печи при постоянной температуре  $400\,^{\circ}$ С оказывает такое же влияние, как и возрастание температуры прокалки при постоянной выдержке ( $t_{\rm np} = {\rm const}$ ). В этом случае, согласно данным работ [17—19], должно происходить снижение содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле в результате уменьшения влаги в порошке. Причем содержание водорода в наплавке может быть не пропорционально количеству удаленной влаги [19] вследствие дополнительной адсорбции из атмосферы и некоторого его количества, растворенного в металле

порошка. При этом десорбция газов начинается при 27 °C (300 K), а заканчивается при 480 °C (753 K) [20].

Были проведены исследования по определению содержания диффузионно-подвижного водорода  $[H]_{\pi}$  в зависимости от времени прокалки. Образцы в виде "карандашной пробы" получали с помощью оплавления сплава системы Ni-Cr-B-Si лазерным излучением. Порошок марки ПГ-СР3 перед наплавкой проходил аналогичные стадии обработки: увлажнение, а затем прокаливание с различной выдержкой при температуре 400 °C. После наплавки и обработки проб осуществляли замер диффузионного водорода по методике, описанной в работе [17]. В этом случае образец помещали в камеру, установленную в печь с температурой 150 °C, способствующей существенному ускорению выхода диффузионного водорода.

По мере выделения водорода из образца через камеру периодически пропускается газноситель Ar, смесь которого анализируется хроматографом. Самописец последовательно записывает приращение объема выделяющегося  $[H]_{\pi}$ . Результаты определения количества диффузионно-подвижного водорода приведены в табл. 3.

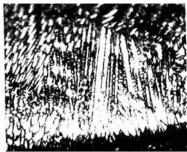
Полученные данные свидетельствуют о том, что снижение коэффициента трещинообразования  $K_{\rm H}$  при выдержке порошка от 10 до 30 мин (см. рис. 2) можно объяснить уменьшением количества диффузионно-подвижного водорода.

Согласно данным работы [21], посвященной вопросам взаимодействия жидкого метал-

3. Результаты определения количества диффузионноподвижного водорода в металле валика после лазерной наплавки сплава системы Ni-Cr-B-Si

Масса образца, г	Время прокалки порошка, мин	Количество диффузионно- подвижного водорода, см <sup>3</sup> /100 г	
0,26	10	1,295	
0,29	20	0,96	
0,21	30		
0,24	40	0	
0,28	50		
Примечание. Атмосферное давление 750 мм рт. ст.			





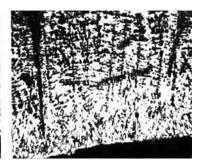


Рис. 3. Структуры наплавленного слоя порошка ПГ-XH80CP3OM после различного времени прокалки ( $\times 600$ ):

a - 10 мин;  $\delta - 30$  мин;  $\epsilon - 60$  мин

ла с газовой фазой, количество растворенных кислорода и водорода зависит от их парциальных давлений:

$$K = P_{\rm H_2}[O]/P_{\rm H_2O}, \qquad (1)$$

где K — константы равновесия;  $P_{\rm H_2}$ ,  $P_{\rm H_2O}$  — парциальное давление водорода и паров воды;  $[{\rm O}]$  — содержание атомарного кислорода, растворенного в металле.

Поэтому парциальное давление водорода над металлом тем меньше, чем больше содержание растворенного в нем кислорода. Согласно закону о влиянии парциального давления на содержание атомарного водорода имеем:

$$[H] = K\sqrt{P_{H_2}}, \qquad (2)$$

тогда снижение парциального давления водорода повлечет за собой уменьшение его количества, растворенного в металле (см. рис. 1).

Следует ожидать, что в данном случае происходит тот же процесс взаимодействия газовой фазы с жидким металлом.

На основе изложенного выше можно предположить, что повышение склонности к образованию трещины с увеличением времени прокалки порошка ПГ-ХН80СР3ОМ от 30 до 60 мин может быть связано с возрастанием содержания кислорода, растворенного в наплавленном металле (см. рис. 2). Количество влаги в этом промежутке времени уже не оказывает влияния на показатель образования трещин  $K_{\rm H}$ . Однако длительная выдержка сплава в печи способствует развитию процессов окисления поверхности порошка с образованием стекловидной фазы сложного состава  $(nB_2O_3 \cdot mSiO_2 \cdot kCr_2O_5 \cdot n)$  NiO) [22], часть которой

не успевает раствориться и в процессе кристаллизации может располагаться в междендритных прослойках. При этом расплав обогащается кислородом, который окисляет входящие в состав γ-фазы элементы Fe, Cr, Si, что приводит к изменению структуры.

Металлографические исследования показали, что после наплавки увлажненным порошком, прокаленным в течение 10 мин, образуется структура, в основном состоящая из сложной эвтектики 85...90 % об. и небольшого количества  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля (рис. 3, a). При наплавке порошка, просушенного в течение 30 мин, образуются в основном дендриты  $\gamma$ -фазы 60...80 % об. и небольшое количество эвтектики (рис. 3,  $\delta$ ). Структура наплавленного слоя из порошка, выдержанного в печи в течение 60 мин, аналогична структуре с малым содержанием  $\gamma$ -раствора (рис. 3,  $\delta$ ).

Уменьшение количества  $\gamma$ -твердого раствора происходит в результате окисления элементов, входящих в его состав. В этом случае могут образовываться сложные оксиды типа (Fe, Cr) $_2$ O $_3$  [23], шпинели  $M_3$ O $_4$  или  $Fe_3$ O $_4$  [24], а также  $SiO_2$ . Соответственно увеличивается количество сложной боросилицидной эвтектики типа (Ni + Ni $_3$ B + Ni $_3$ Si), представляющей собой малопластичную фазу, как результат — возрастает коэффициент трещинообразования.

Таким образом, повышенное содержание в порошке влаги, являющейся источником диффузионно-подвижного водорода и кислорода, оказывает отрицательное влияние на технологическую прочность. Поэтому перед наплавкой следует прокаливать порошок в печи в течение 30 мин при температуре 400 °C.

### Выводы

Влага, содержащаяся в порошке в результате адсорбции из атмосферы, отрицательно влияет на технологическую прочность. Являясь источником диффузионно-подвижного водорода и кислорода, влажность способствует окислению химических элементов сплава системы Ni—Cr—B—Si, входящих в состав γ-фазы, приводя к кристаллизации структуры, менее стойкой к образованию трещин.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Медовар Б.И.** Влияние водорода, кислорода и азота на образование горячих трещин в сварных швах на сталях типа 18-8 // Автоматическая сварка. 1953. No 4. C. 37-44.
- 2. **Якушин Б.Ф., Мисюров А.И., Шубин В.И.** Влияние влажности сварочных материалов на появление горячих трещин // Известие вузов. Машиностроение. 1980. № 12. С. 96—99.
- 3. **Прохоров Н.Н.** Физические процессы в металлах при сварке. Т. 1. Элементы физики металлов и процесс кристаллизации. М.: Металлургия, 1968. 696 с.
- 4. **Прохоров Н.Н.** Горячие трещины при сварке. М.: МАШГИЗ, 1952. 220 с.
- 5. **Яровинский Л.М.** Электроды ЦНИИТМАШ для сварки сталей и наплавки. М.: Машгиз, 1954. 84 с.
- 6. **Мороз Л.С., Чечулин Б.Б.** Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1967. 255 с.
- 7. **Мороз Л.С.** Механика и физика деформаций и разрушения материалов. Л.: Машиностроение, 1984. 224 с.
- 8. **Морозов В.П.** Разработка способа и технологии восстановления авиационных деталей и узлов с помощью лазерной наплавки: дис.... канд. техн. наук. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987. 284 с.
- 9. **Порошковые** наплавочные материалы, получаемые распылением в инертной атмосфере / Д.А. Дудко, В.И. Зеленин, И.Г. Прихно и др. // Современные методы наплавки в наплавочные материалы: тез. докл. 1 Всесоюзной науч.-техн. конф. Киев, 1978. С. 56—58.
- 10. Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Сом А.И. Порошки для плазменной наплавки // Теоретические основы наплавки. Киев, 1978. С. 75—87.
- 11. **Фрумин И.И., Гладкий П.В., Переплетчи- ков Е.Ф.** Некоторые свойства присадочных порошков для наплавки и металлизации // Автоматическая сварка. 1971. № 11. С. 32—35.
- 12. Федоров Б.М. Оптимизация параметров лазерной сварки с целью повышения прочности сварных соединений никелевых сплавов: дис.... канд. техн.

- наук: 05.04.05. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1984. 245 с.
- 13. Потапов Н.Н. Основы выбора флюсов при сварке сталей. М.: Машиностроение, 1979. 169 с.
- 14. **Косырев Ф.К., Косырев Н.П., Лунев Е.И.** Экспериментальная лазерная установка Л.Т-1 // Автоматическая сварка. 1976. № 9. С. 72—73.
- 15. **Исследование** лазерной наплавки с присадкой порошка / С.А. Семенов, С.Р. Мильруд, П.А. Манько и др. // Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны: тез. докл. Всесоюзной конф. Киев, 1984. С. 35—37.
- 16. **Шибаев В.В.** Разработка процесса получения поверхностных покрытий из Ni—Cr—B—Si сплавов при помощи лазерного излучения: дис.... канд. техн. наук: 05.04.05. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1983. 184 с.
- 17. **Макаров Э.Л.** Холодные трещины при сварке легированных сталей. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
- 18. **Козлов Р.А., Макошина А.И.** Влияние температуры прокалки флюса КФ-16 на содержание водорода и свойства наплавленного металла // Сварочное производство. 1982. № 7. С. 23—24.
- 19. **Боровушкин И.В.** Влияние водорода на свойства околошовной зоны сварных соединений из высокопрочной стали  $16\Gamma 2A\Phi$  // Сварочное производство. 1985. № 11. С. 19—20.
- 20. **Гарашп А.П., Швайко-Швайковский В.Е.** Исследование взаимодействия кубического нитрида бора ( $\beta$ –BN) с кислородом и азотом // Сверхтвердые материалы. 1986. № 1. С. 19—23.
- 21. **Баженов В.В.** О природе пор в швах при сварке конструкционных сталей качественными электродами ЦИИНТМАШ // Исследование по технологии сварки. Кн. 60. М.: Машгиз, 1953. С. 67—71.
- 22. **Харченко В.С., Абрашкин А.В., Белый А.А.** Износостойкость Ni—Cr—B—Si сплавов в условиях граничного трения и повышенных температур // Современные методы наплавки и наплавочные материалы: тез. докл. 1 Всесоюзной науч.-техн. конф. Киев, 1978. С. 17—18.
- 23. **Переплетчиков В.Ф.** О коррозионной стойкости сплавов для наплавки уплотнительных поверхностей пароводяной арматуры // Коррозионностойкие наплавки и их применение в промышленности. Л.: ЛДНТП, 1975. С. 11—17.
- 24. **Жаростойкость** в водяном паре наплавленного металла уплотнительных поверхностей арматуры / В.И. Никитин, Ю.Д. Скляров, И.П. Комиссарова и др. // Автоматическая сварка. 1976. № 12. С. 20—23.

Валерий Петрович Морозов, канд. техн. наук, VMorozov.52@mail.ru; Юрий Геннадьевич Романов, канд. техн. наук

# КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО



УДК 621.979.06

**Е.Н. Складчиков** (Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана), **В.С. Гаврилов** (НПП "АВИВАК", г. Москва)

### **Двухкоординатный перекладчик для кривошипного горячештамповочного пресса**

Рассмотрена конструкция двухкоординатного перекладчика для кривошипного горячештамповочого пресса с приводом от одного пневмоцилиндра с минимальным числом кинематических пар. Перекладчик не содержит систему управления, обеспечивающую требуемую последовательность движений захватных органов и подверженную сбоям в работе, что может привести к аварийной ситуации в работе пресса. Перекладчик отличается простотой конструкции и повышенной надежностью.

**Ключевые слова:** кривошипный горячештамповочный пресс; перекладчик; захватные органы; пневмоцилиндр; кинематическая пара.

The biaxial transmitter design for hot stamping crank press with drive from one air cylinder with the minimal number of kinematic pairs is considered. The transmitter does not contain the control system providing required sequence of movements of gripping devices and subject failures in work that can lead to emergency in work of press. The transmitter differs simplicity of design and increased reliability.

**Keywords:** hot stamping crank press; transmitter; gripping devices; air cylinder; kinematic pair.

Двух- и трехкоординатные перекладчики для кривошипных прессов, как правило, имеют средства отдельных перемещений захватного органа по каждой из координат, например, в виде пневмоцилиндров [1]. Требуемая последовательность движений обеспечивается системой управления, сблокированной с системой управления пресса. При этом велика вероятность сбоев в системах управления, что может стать причиной аварийной ситуации. Высока конструктивная сложность таких перекладчиков.

Существуют перекладчики с приводом движений от кулачковых механизмов [2]. Для них характерна сложная кинематика с большим числом звеньев и кинематических пар.

Рассмотрена конструкция двухкоординатного грейферного перекладчика для многоручьевой штамповки на *кривошипном горячештамповочном прессе* (КГШП), приводимого от одного пневмоцилиндра.

Перекладчик (рис. 1) смонтирован на нижней плите I штампового блока. Он содержит каретки 2 и 3 продольного перемещения заготовок, каждая и которых смонтирована на шариковых цилиндрических направляющих 4. Направляющие закреплены к штамповой плите с помощью стоек 5. В каждой каретке установлены парные захватные органы в виде штоков 6 с подпружиненными губками 7. Штоки выполнены со щелевидными пазами, в которых размещены линейки 8 и 9 со спрофилированными, идентичными друг другу прорезями по числу захватных органов каждой каретки. В штоках 6 установлены штифты 10, сочлененные с линейками через их прорези.

Синхронные продольные перемещения кареток осуществляются с помощью пневмоцилиндра 11 через поперечину 12 и тяги 13, 14 и линейки. Перекладчик снабжен блокираторами 15 и 16 с замкнутыми канавками прямоугольной формы. Каждый из блокираторов

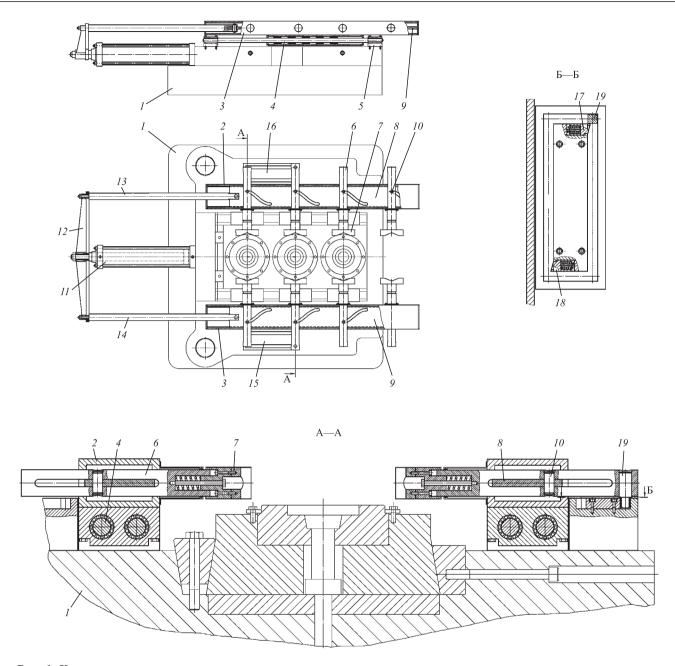


Рис. 1. Конструктивная схема перекладчика

содержит подпружиненные защелки 17 и 18. В штоках одной из пар захватных органов закреплены шипы 19, рабочая часть которых размещена в канавках блокираторов.

Предусмотрены средства защиты кинематических пар конструкции от попадания окалины. Цикловая диаграмма работы пресса и перекладчика показана на рис. 2. Отсутствие рабочих перемещений перекладчика по третьей координате предполагает применение КГШП с большими ходами верхнего и нижнего выталкивателей, например КГШП с вы-

талкивателями, приводимыми от гидроцилиндров. Работа выталкивателей должна быть настроена так, чтобы осуществить выталкивание заготовок и их подъем на высоту захвата перекладчиком [3].

Работа перекладчика выполняется следующим образом. Его исходное положение показано на рис. 3, a. При перемещении штока пневмоцилиндра 11 начинают двигаться линейки 8 и 9 при неподвижных каретках 2 и 3. Прорези линеек через штифты 10 перемещают парные захватные органы навстречу другу другу

Устрой- ство	Рабочие органы	Периоды	Продолжительность	
	Ползун	Холостой ход приближения		
		Рабочий ход	I	
		Холостой ход вверх		
Пресс	Нижний	Рабочий ход	_	
	выталки- ватель	Возвратный ход		
	Верхний выталки- ватель	Рабочий ход		
		Возвратный ход	<b>L</b>	
	Захватные органы	Захват заготовок	_	
Пере- клад- чик	Каретки	Перемещение заготовок		
	Захватные органы	Освобождение заготовок	4	
	Каретки	Возвратный ход		
Время				

Рис. 2. Цикловая диаграмма работы пресса с перекладчиком

(рис. 3,  $\delta$ ). Последние осуществляют захват заготовок в каждой позиции штамповки. При исчерпании возможности перемещения линеек относительно кареток они при продолжении перемещения штока пневмоцилиндра начинают движение вместе с каретками. Заготовки перемещаются на межручьевое расстояние (рис. 3,  $\delta$ ). При реверсировании пневмоцилиндра линейки  $\delta$  и  $\delta$  при неподвижных каретках  $\delta$  и  $\delta$ 

разводят захватные органы (рис. 3,  $\epsilon$ ). Затем при совместном движении линеек и кареток осуществляется возврат перекладчика в исходное положение (см. рис. 3, a).

Перекладчик представляет собой механическую систему с двумя степенями свободы. В начале движения штока пневмоцилиндра из любого из крайних положений движение захватных органов возможно в направлении продольного перемещения и в направлении поперечного перемещения (захват заготовки, ее освобождение) в зависимости от того, в направлении какого перемещения будет меньшая сила сопротивления. Это создает неопределенность в последовательности движений захватных органов. Для снятия такой неопределенности перекладчик снабжен блокираторами.

Как видно из рис. 1, защелки 17 и 18 исключают начальное движение захватных органов, а вместе с ними и кареток в продольном направлении. Последнее возможно после завершения движения захватных органов в поперечном направлении. При завершении дальнейшего продольного перемещения шип

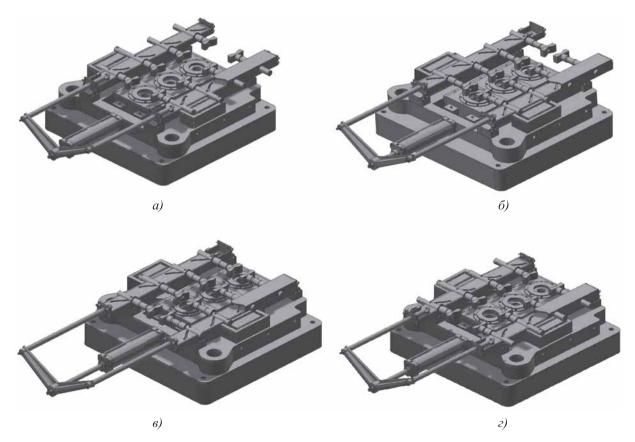


Рис. 3. Последовательность движений захватных органов перекладчика

отжимает соответствующую защелку, которая будет препятствовать началу продольного перемещения захватных органов при обратном ходе пневмоцилиндра.

Перекладчик по [1] содержит семь пневмоцилиндров привода и 92 кинематические пары.

Перекладчик по [2] содержит три кулачковых механизма, пять пневмоцилиндров и электродвигатель привода, 77 кинематических пар.

Предлагаемая конструкция перекладчика содержит один пневмоцилиндр привода, три неповторяющиеся кинематические пары при общем числе кинематических пар 13.

#### Вывол

Предложенная конструкция двухкоординатного перекладчика значительно проще известных, не имеет системы управления, обеспечивающей требуемую последовательность движений перекладчика и подверженной сбо-

ям в работе, приводящим к возникновению аварийных ситуаций. Последнее существенно повышает надежность работы перекладчика.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Грейферное** подающее устройство к прессу: а.с. 1433594 СССР / Б.С. Карасев, Ю.Н. Любимов, В.М. Мороз и др. 1988. Бюл. № 40.
- 2. **Грейферная** подача к штамповочному прессу: пат. 2146618 Российская Федерация / А.Т. Ачкасов. 2000.
- 3. **Кривошипные** горячештамповочные прессы в современном кузнечно-штамповочном производстве. Самара. 2011. Режим доступа: http://metallicheckiy-portal.ru/articles/obrabotka/shtampovka/pressi\_krivoshipnie\_ goracheshtampovochnie/1 (дата обращения 23.01.2019).

Евгений Николаевич Складчиков, д-р техн. наук, ens\_0@mail.ru; Виктор Сергеевич Гаврилов







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; 539.374

В.И. Трегубов, С.Н. Ларин, А.А. Пасынков (Тульский государственный университет), Г.А. Нуждин (Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС")

### Оценка влияния геометрии инструмента на силовые параметры совмещенного процесса вытяжки и отбортовки

Получены результаты теоретических исследований по установлению закономерностей влияния технологических параметров, геометрии рабочего инструмента на силовые режимы при одновременной вытяжке и отбортовке листовых заготовок с отверстием. На основе метода конечных элементов выполнено исследование силовых режимов процесса вытяжки и отбортовки.

Ключевые слова: отбортовка; вытяжка; деформирование; напряжения; совмещение операций; сила.

The results of theoretical studies to establish of the regularities of the effect of technological parameters, the geometry of the working tool on the power modes while drawing and flanging of sheet blanks with hole are obtained. The study of the power modes of drawing and flanging is performed on the basis of the finite element method.

**Keywords:** flanging; drawing; deformation; stress; combination of operations; power.

В настоящее время тенденции развития различных отраслей промышленности отличаются резким повышением требований к качеству и эксплуатационным характеристикам изделий при удешевлении их производства [1—3]. Это способствует разработке высокоэффективных технологических процессов, отвечающих данным требованиям и позволяющих экономить материальные и энергетические ресурсы, трудовые затраты. Перспективными являются технологии, в которых совмещены несколько операций за один ход инструмента, например, вытяжка и отбортовка [4, 5].

Статья посвящена исследованию энергосиловых параметров формоизменения изделий с отверстием применительно к изготовлению деталей и узлов изделий ответственного назначения.

На основе метода конечных элементов исследованы силовые режимы процесса вытяжки и отбортовки. Схема процесса приведена на рис. 1.

Исследование выполнено в программном комплексе Qform 3D. Материал заготовки — листовой материал из стали 12X18H10T, кривая упрочнения которого представлена на рис. 2 (где  $\sigma_{\rm B}$  — предел прочности;  $\xi$  — деформация). В процессе исследования изменяли радиус матрицы  $R_{\rm M}=3...15$  мм, коэффициент трения  $\mu=0.05...0.5$  и радиус пуансона  $R_{\rm \Pi}=2...10$  мм.

На рис. 3 показаны зависимости, позволяющие выявить влияние относительного радиуса закругления матрицы и пуансона, а также

коэффициента трения на удельное давление процесса при различной толщине заготовки *s*.

Из анализа рис. 3 установлено, что с ростом  $\overline{R}_{\Pi}$  величина  $\overline{q}$  уменьшается. С увеличением коэффициента трения удельное давление повышается.

На рис. 4 приведены зависимости, позволяющие выявить влияние радиуса закругления матрицы и пуансона на удельное давление процесса. Определено, что с ростом  $\overline{R}_{\scriptscriptstyle \Pi}$  и  $\overline{R}_{\scriptscriptstyle M}$  величина  $\overline{q}$  уменьшается.

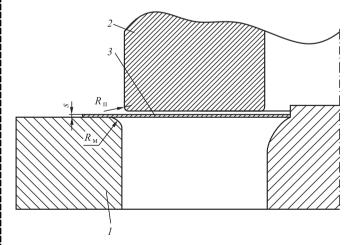


Рис. 1. Схема процесса:

I — пуансон—матрица для вытяжки и отбортовки; 2 — заготовка; 3 — матрица—пуансон для вытяжки и отбортовки

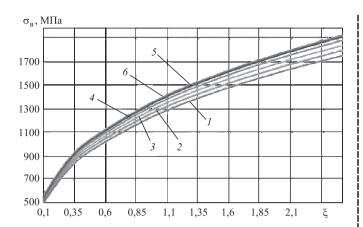


Рис. 2. Кривая упрочнения стали 12Х18Н10Т:

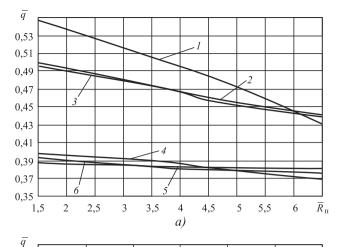
I — скорость деформации  $\varepsilon$  = 0,01 c  $^{-1}$ ; 2 — 0,1 c  $^{-1}$ ; 3 — 1 c  $^{-1}$ ; 4 — 10 c  $^{-1}$ ; 5 — 50 c  $^{-1}$ ; 6 — 100 c  $^{-1}$ 

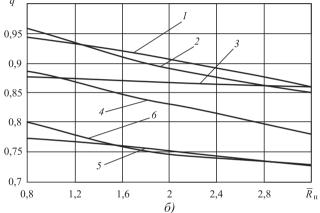
На рис. 5 представлены зависимости удельного давления  $\bar{q}$  от перемещения  $\bar{h}=h_{_{\rm I}}/h_{_{\rm II}}$  (где  $h_{_{\rm II}},h_{_{\rm II}}$  — высота детали и ход пуансона).

Анализ рис. 5 показал, что при совмещении операций вытяжки и отбортовки максимальная сила наблюдается в момент окончания процесса деформирования при формировании окончательной геометрии детали. Установлено, что с увеличением коэффициента трения  $\mu$  от 0,05 до 0,5 максимальная сила P возрастает на 30 %.

Рекомендации по проектированию технологических процессов вытяжки и отбортовки листовых заготовок с отверстием и их совмещения в одном переходе:

- 1. Проверяют условие совместного протекания операций вытяжки и отбортовки.
- 2. Использование совмещения в одном технологическом переходе отбортовки с частично проходящей вытяжкой позволяет получать изделия в виде втулки с фланцем. При этом диаметр исходной заготовки, обеспечивающей получение одинаковой детали по сравнению с вытяжкой, может быть уменьшен. Это приводит к экономии материала. При вытяжке из плоской заготовки, имеющей центральное отверстие, при частично проходящей отбортовке возможно получение стаканчика с отверстием в дне или большей высоты по сравнению с традиционной технологией или из заготовки меньших размеров. В обоих случаях интенсифицируется процесс формоизменения и экономится металл.
- 3. Пробивка отверстия в центре заготовки до или в процессе ее формообразования возможна только в том случае, когда к его размерам не предъявляются жесткие требования по точности. Причем более точная геометрия





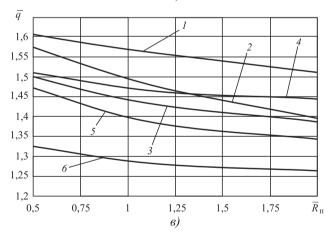


Рис. 3. Зависимости удельного давления  $\overline{q}$  от относительного радиуса закругления пуансона  $\overline{R}_{\rm n}$  при толщине заготовки 1,5 (a), 3,0 (б) и 5 мм (в):

$$\begin{array}{l} 1-\overline{R}_{\rm m}=3~{\rm mm},~~\mu=0,1;~2-\overline{R}_{\rm m}=5~{\rm mm},~\mu=0,1;~3-\overline{R}_{\rm m}=\\ =10~{\rm mm},~\mu=0,1;~4-\overline{R}_{\rm m}=3~{\rm mm},~\mu=0,05;~5-\overline{R}_{\rm m}=5~{\rm mm},\\ \mu=0,05;~6-\overline{R}_{\rm m}=10~{\rm mm},~\mu=0,05 \end{array}$$

отверстия получается в случаях, когда пробивка отверстия осуществляется на завершающем этапе вытяжки. Точные отверстия можно получить только при небольших степенях деформации или вводя обрезку после завершения формоизменения.

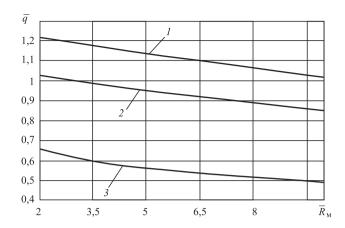


Рис. 4. Зависимость удельного давления  $\overline{q}$  от радиуса закругления матрицы  $\overline{R}_{\rm M}$  (s=1,5 мм,  $\mu=0,05$ ):

$$1-~\bar{R}_{_{\Pi}}=2.5~\mathrm{mm};~2-~\bar{R}_{_{\Pi}}=5~\mathrm{mm};~3-~\bar{R}_{_{\Pi}}=10~\mathrm{mm}$$

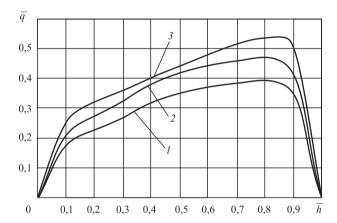


Рис. 5. Зависимости удельного давления  $\bar{q}$  от перемещения  $\bar{h} = h_n/h_n$ :

$$1 - \mu = 0.05$$
;  $2 - \mu = 0.25$ ;  $3 - \mu = 0.5$ 

4. Условием совмещенного протекания операций вытяжки и отбортовки является равенство меридиональных напряжений, возникающих в каждой из зон на границе их раздела. Границей раздела зон в данном случае является цилиндрический участок заготовки, имеющий радиус матрицы.

Поскольку между зонами отбортовки и вытяжки находится упругий участок, деформация в каждой зоне происходит автономно, в соответствии с закономерностями, присущими отдельной операции. Поэтому формоизменение в рассматриваемом технологическом процессе ограничивается максимальным значением осевого напряжения в стенке детали на выходе из очага деформации, допустимой степенью использования ресурса пластичности и критерием локальной потери устойчивости анизотропной заготовки.

- 5. Толщина металла изменяется вдоль образующей борта от исходной в зоне сопряжения с фланцем до конечной на кромке борта.
- 6. Диаметр отверстия вычисляют при условии, что длина образующей борта при его формообразовании остается неизменной.
- 7. Зазор между матрицей и пуансоном принимают на 10...20 % больше толщины заготовки.
- 8. Радиус кривизны рабочей кромки матрицы и радиус кривизны кромки пуансона назначают согласно чертежу детали.

Изменяя силу прижима, можно регулировать меридиональные напряжения в зоне вытяжки и, следовательно, управлять соотношением коэффициентов вытяжки и отбортовки. При этом от совмещения с превалированием вытяжки можно перейти к совмещению с превалированием отбортовки.

Заключение. Установлено влияние таких параметров, как степень деформации, размеры инструмента, параметры трения и размеры заготовок на силу при совмещении операций вытяжки и отбортовки.

Результаты позволяют выявить рациональные соотношения параметров инструмента и могут быть применены при создании технологических процессов изготовления габаритных изделий типа "стакан" с внутренней горловиной, характеризующихся эффективностью, заключающейся в сокращении переходов штамповки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Нечепуренко Ю.Г., Яковлев С.П., Яковлев С.С.** Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала. Тула: ТулГУ, 2000. 195 с.
- 2. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант, 1997. 331 с.
- 3. **Яковлев С.С., Суков М.В.** Подход к анализу операции отбортовки плоских заготовок с отверстием из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Серия "Технические науки". 2008. Вып. 4. С. 56—61.
- 4. **Евсюков С.А.** Отбортовка горловин на заготовках, имеющих анизотропное упрочнение // Кузнечно-штамповочное производство. 1994. № 11. С. 17—19.
- 5. **Investigation** on the forming process and the shape control in electromagnetic flanging of aluminum alloy / Hongliang Su, Liang Huang, Jianjun Li, Guodong Li, Pan Huang // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207. P. 335—340.

Виктор Иванович Трегубов, д-р техн. наук; Сергей Николаевич Ларин, д-р техн. наук, mpf-tula@rambler.ru;

Андрей Александрович Пасынков, канд. техн. наук; Георгий Анатольевич Нуждин, канд. техн. наук

### ПРОКАТНО-ВОЛОЧИЛЬНОЕ

# 63

### LIPONSBOTCLEO

УДК 620.17

Н.Н. Загиров<sup>1</sup>, Ю.Н. Логинов<sup>2</sup>, Е.В. Иванов<sup>1</sup>, Р.Р. Ризаханов<sup>1</sup>

(1Сибирский федеральный университет, г. Красноярск,

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

# Изготовление прутков и проволоки из стружки силумина с использованием прямой горячей экструзии цилиндрических брикетов

Приведены результаты экспериментального исследования получения прутковых заготовок из стружки алюминиевого сплава АК12. Сделано сравнение вариантов получения продукции с использованием методов холодного и горячего брикетирования. Отмечена возможность достижения показателя относительного удлинения до 20 %, что позволяет отнести полученный материал к классу силуминов, и выполнять пластическую деформацию в отличие от существующей классификации, относящих материал к классу литейных сплавов. Полученную проволоку можно применить для опытной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов.

**Ключевые слова:** силумин; алюминиевые сплавы; стружка; горячая деформация; холодная деформация; уплотнение; экструзия; брикетирование.

The experimental study results of the production of bar stocks from aluminum AK12 alloy chip are presented. Comparison of production options using of cold and hot briquetting methods is made. The possibility of achieving of the relative elongation up to 20 % is noted, which allows to classify the material obtained to the class of silumins, which enable plastic deformation, in contrast to the existing classification, which classifies the material to the class of cast alloys. The obtained wire can be used for conducting experimental soldering of waveguide paths from aluminum alloys.

**Keywords:** silumin; aluminum alloys; chip; hot deformation; cold deformation; compaction; extrusion; briquetting.

Введение. В последнее время в машиностроении все большее внимание уделяется методам утилизации сыпучих отходов в виде стружки. Прежние способы переработки были основаны исключительно на переплаве, т.е. доведении до состояния расплава. Однако недостатки такого способа: значительное окисление поверхности, угар металла — приводили к большим потерям, поэтому стружка как вторичное сырье оказывалась наименее ценным компонентом шихты [1].

При решении задач, относящихся к поиску и разработке наиболее эффективных путей вовлечения в производственный оборот сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов, минуя их переплав [2, 3], возможны два подхода.

Один из них связан с включением операций горячей экструзии [4] и холодного волочения, в существующую технологическую схему переработки сыпучих отходов, например, после проведения предварительного холодного брикетирования стружки перед переплавом [5].

Другой подход базируется на применении для получения из сыпучей стружки промежуточных полуфабрикатов в виде, например, прутка [6] специально сконструированных для этого устройств типа установок совмещенной прокатки—прессования (СПП) [7—9], работающих в полунепрерывном или непрерывном режимах.

Каждый из подходов имеет преимущества и недостатки, связанные с технологичностью

выполнения отдельных приемов при их осуществлении и с экономическими аспектами реализации указанных вариантов.

*Цель работы* — оценка вариантов переработки стружковых отходов двойных силуминов типа AK12.

Описание возможных технологических схем. Изучим более подробно вариант, при реализации которого брикеты из стружки можно рассматривать как заготовки для получения пресс-изделий традиционным способом горячей дискретной экструзии на гидравлических прессах вертикального или горизонтального исполнения. Порядок действий при их работе в случае применения стружковых брикетов практически ничем не отличается от того, что принят при использовании для изготовления соответствующей номенклатуры изделий литых заготовок. Однако при этом необходимо учитывать, что в процессе экструзии брикетов, относительная плотность которых составляет, как правило, не выше 70...80 %, наблюдается изменение не только их формы (при распрессовке), но и объема, что вносит свою специфику в характер формоизменения и силовой режим осуществления операции по сравнению с деформацией монолитных металлов и сплавов [Дегтярев И.С., Логинов Ю.Н., Колмогоров В.Л. Прессование некомпактного материала через коническую матрицу // Технология легких сплавов. 1975. № 6. С. 24—27.].

Для обеспечения максимальной эффективности от практического внедрения указанного подхода по переработке стружковых отходов в реальное производство важное значение имеет минимизация затрат для осуществления включения проводимых с этой целью мероприятий в действующий производственный процесс.

Под переработкой стружковых отходов двойных силуминов типа AK12 можно понимать потенциальное использование в качестве заготовок для изготовления горячей экструзией прутков брикетов, получаемых на предприятиях РУСАЛ, занимающихся изготовлением литых дисков колес, на специализированных брикетировочных прессах фирмы RUF разной мощности.

Общий вид одного из прессов модели RB4/2400/60×60 показан на рис. 1. На рис. 2 приведена его конструктивная схема.

Принцип действия пресса основан на холодном двухкратном гидравлическом прессова-



Рис. 1. Общий вид брикетировочного пресса RB4/2400/60×60

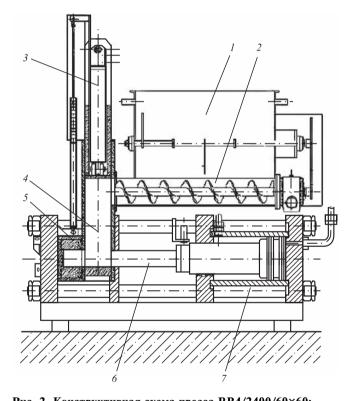


Рис. 2. Конструктивная схема пресса RB4/2400/60×60: 1 — бункер; 2 — загрузочный шнек; 3 — цилиндр предварительного сжатия со штоком; 4 — камера предварительного сжатия; 5 — пресс-форма; 6 — пуансон; 7 — главный цилиндр

нии определенной порции сыпучего материала без добавления связующих веществ. В начале, при небольшом давлении, происходит внешнее уплотнение материала за счет ликвидации пустот между частицами. Затем деформируются и сами частицы — между ними возникает молекулярное сцепление. Высокое давление в конце прессования приводит к переходу

упругих деформаций частиц в пластические, вследствие чего структура брикета упрочняется настолько, что позволяет сохранять заданную форму брикета после его извлечения. На характер деформаций сильно влияют свойства исходного материала.

При работе брикетировочного пресса на каждом цикле происходит формирование одного брикета и одновременное извлечение брикета, сформированного на предыдущем цикле.

С использованием прессов соответствующей мощности можно формировать брикеты различной формы и размеров поперечного сечения, а также заданной высоты и уровня плотности. В качестве примера на рис. 3, а показан общий вид получаемого брикета. Максимальное рабочее давление брикетирования при его изготовлении не превышает 240 МПа, что позволяет, как показали результаты специально проведенных замеров, достичь уровня средней интегральной плотности 2,0...2,1 г/см<sup>3</sup>.

Методика получения конечного продукта. Практическое моделирование процесса горячей экструзии проводили с использованием заготовок — брикетов разной высоты, полученных брикетированием стружки в закрытой пресс-форме на гидравлическом прессе при комнатной температуре (рис.  $3, \delta$ ).

Давление брикетирования в каждом опыте было одинаковым и составляло 180 МПа. Время выдержки при этом давлении принято равным 5 мин. Выбор в качестве исходных заготовок брикетов, полученных холодным брикетированием, объясняется тем, что с одной



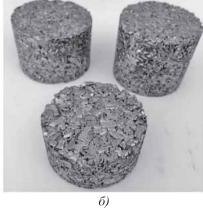


Рис. 3. Получаемый полуфабрикат после брикетирования стружки из сплава AK12 на прессе RB4/2400/60×60 в заводских условиях (a) и брикеты-заготовки, используемые для моделирования процесса горячей экструзии в лабораторных условиях (б)

стороны, вариант с изготовлением прутков диаметрами 8 и 6 мм из горячебрикетированной стружки AK12 был опробован авторами ранее [11].

С другой стороны, применение для изготовления прутков указанных диаметров холоднобрикетированных стружковых заготовок практичнее и актуальнее, так как в этом случае плотность используемых брикетов близка к плотности брикетов из той же стружки AK12 (несмотря на отличие по форме), получаемых при работе брикетировочных прессов фирмы RUF в условиях реального производства. Это видно по фотографиям указанных брикетов, представленных на рис. 3.

Для обеспечения сопоставимого в этом случае соотношения между площадью поперечного сечения и высотой брикета при проведении экспериментов в лабораторных условиях в одном случае использовали цельный, относительно высокий брикет, а в другом — требуемой задаваемой высоты брикета добивались за счет применения составной равноплотной заготовки, состоящей из 2—3 брикетов небольшой высоты (плотность каждого составляла 2,0...2,1 г/см³) при схемах сборки, представленных на рис. 4.

Температурно-скоростной режим экструзии при использовании цельных и составных высокопористых брикетов-заготовок, полученных холодным брикетированием стружки, оставался идентичным тому, что был реализован при применении указанного выше варианта с использованием заготовок, полученных предварительным горячим брикетированием

стружки. Он соответствовал параметрам, рекомендуемым для горячего прессования прутков из труднодеформируемых алюминиевых сплавов, т.е. когда температура нагрева заготовки 430...450 °C, а скорость прессования 5...10 мм/с [Ерманок М.З., Фейгин В.И., Сухоруков Н.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1977. 264 с.].

Учитывая, что при экструзии алюминиевых заготовок, в том числе и высокопористых, можно обеспечить изотермические условия деформирования, т.е. равенство температур нагрева инструмента и деформируемого металла, в экспериментах цельные и составные брикеты

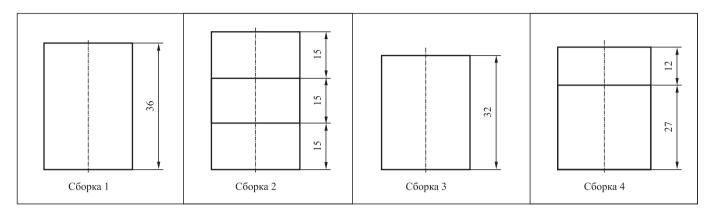


Рис. 4. Схемы сборки брикетов

с нанесенной на все контактные поверхности с инструментом смазкой в виде смеси графита с маслом нагревали вместе с инструментальной оснасткой. Для этого использовали установку (рис. 5), снабженную специальным стационарным нагревательным устройством, представляющим собой теплоизоляционный каркас с нагревательным элементом в виде нихромовой спирали. Для поддержания необходимой температуры устройство имеет верхнюю и нижнюю крышку, также изготовленные из теплоизоляционного материала. Размеры внутреннего рабочего пространства печи позволяют достаточно свободно разместить всю оснастку.

Процесс экструзии и работа установки происходят следующим образом. Брикет (цельный или составной), помещенный в контейнер вместе с пуансоном, пресс-шайбой и матрицей, нагревают до требуемой температуры. Давление от траверсы пресса через пуансон и прессшайбу передается на брикет, происходят его доуплотнение, распрессовка и последующее выдавливание через очко матрицы. Прессостаток ориентировочно составляет 3...5 мм.

Далее установку разбирают, вместо матрицедержателя с подкладкой устанавливают съемное кольцо, и происходит выпрессовка прессостатка вместе с матрицей и полученным профилем. Затем пресс-изделие отделяют от

пресс-остатка и охлаждают на воздухе.

Экструзией получали прутки диаметрами 6 и 8 мм (коэффициент вытяжки при этом составлял  $\lambda \approx 56$  и  $\lambda \approx 32$  соответственно).

Эксперименты по реализации процесса экструзии с использованием холодно-компактированных брикетов показал, что независимо от использования цельной или составной заготовки и получаемого диаметра прутка истечение материала из матрицы происходит устойчиво без каких-либо нарушений сплошности.

Оценка свойств полученных заготовок. После экструзии у прутков отделяли передний слабодеформированный

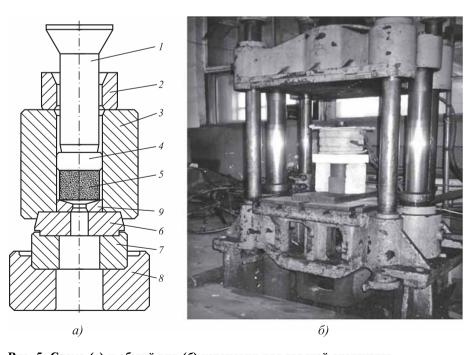


Рис. 5. Схема (а) и общий вид (б) установки для горячей экструзии: 1 — пресс-штемпель; 2 — ограничитель хода; 3 — контейнер; 4 — пресс-шайба; 5 — заготовка; 6 — подкладка; 7 — матрицедержатель; 8 — основание; 9 — матрица

конец длиной 80...100 мм. Далее из одного из попарно отпрессованных прутков каждого диаметра, полученных из разных по типу (цельная или составная) заготовок, изготовляли образцы для проведения механических испытаний на растяжение. При этом отдельные фрагменты, из которых их вытачивали, брали из разных мест по длине прутка. Другие прутки, полученные в идентичных с первым опытом условиях, служили заготовками для последующей холодной обработки волочением.

Механические испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 10446—80 на универсальной испытательной машине LFM 400. Для этого из пресс-изделий и тянутых прутков диаметром 5 мм и более изготовляли гантелеобразные образцы с соотношением размеров рабочей части длины и диаметра  $l_0/d_0=5$ , а из проволоки диаметром менее 5 мм отбирали фрагменты с длиной рабочего участка 50 мм. На каждую точку испытывали по три образца, а за конечный результат при определении временного сопротивления разрыву  $\sigma_{\rm B}$ , относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$  принимали их средние значения.

Волочение осуществляли на цепном волочильном стане ЦВС-3 с использованием на первом этапе следующих маршрутов (измене-

ние диаметра проволоки по переходам волочения, мм):

- 1)  $\varnothing$  8 mm  $\rightarrow$   $\varnothing$  7,5 mm  $\rightarrow$   $\varnothing$  7,2 mm  $\rightarrow$   $\rightarrow$   $\varnothing$  6,6 mm  $\rightarrow$   $\varnothing$  6,0 mm;
- 2)  $\varnothing$  6 mm  $\rightarrow$   $\varnothing$  5,7 mm  $\rightarrow$   $\varnothing$  5,4 mm  $\rightarrow$   $\varnothing$  5,0 mm.

В табл. 1 приведены результаты механических испытаний прутков и проволоки, полученных горячей экструзией и волочением из сформированных по разным вариантам (цельная или составная) холодносбрикетированных заготовок.

Установлено, что на начальном этапе независимо от диаметра получаемого горячей экструзией прутка и типа используемой при этом заготовки средние значения исследуемых показателей механических характеристик материала мало отличаются друг от друга. Диапазон изменения значений временного сопротивления разрыву  $\sigma_{\rm B}$  составляет от 170 до 180 МПа, относительного удлинения  $\delta$  — от 15 до 20 %, относительного сужения  $\psi$  — от 30 до 40 %. При этом с учетом мест отбора образцов для проведения испытаний каких-либо особенностей в формировании свойств по длине прутка не наблюдается, т.е. происходит достаточно однородное их распределение вдоль всей длины.

Таким образом, с точки зрения достижения повышенного выхода годного можно за

1. Результаты механических испытаний (средние значения) на растяжение прутков, полученных с использованием различных вариантов формирования исходной заготовки

Этап обработки	Параметр	Номер схемы сборки в соответствии с рис. 4			
		1	2	3	4
	Диаметр прутка, мм	$8 \\ (\lambda = 32)$		6 (λ = 56)	
Горячая экструзия	σ <sub>в</sub> , МПа	177,5	169	181,5	177
	δ, %	19,5	16,5	17	15,5
	ψ, %	37,5	33	28	32,5
Горячая экструзия + волочение	Диаметр прутка, мм	$7,5 \\ (\varepsilon_{\Sigma} = 12 \%)$		$5,4 \\ (\varepsilon_{\Sigma} = 19 \%)$	
	σ <sub>в</sub> , МПа	215,5	204	220	228,5
	δ, %	12	10,5	7	9
	ψ, %	28	23	24	19
Горячая экструзия + волочение	Диаметр прутка, мм	$6 \\ (\varepsilon_{\Sigma} = 44 \%)$		$\begin{array}{c} 5 \\ (\varepsilon_{\Sigma} = 31 \%) \end{array}$	
	σ <sub>в</sub> , МПа	261	267	250,5	243,5
	δ, %	3,5	3,5	1	4
	ψ, %	18	17	9,5	21,5
Обозначение: $\epsilon_{\Sigma}$ — суммарное относительное обжатие при волочении.					

счет использования наборной заготовки обеспечить при заданном ее диаметре необходимую по технологическим соображениям высоту, а следовательно, и длину отпрессованного прутка. Достижение показателя относительного удлинения до 20 % позволяет отнести полученный материал к классу силуминов, позволяющих осуществлять пластическую деформацию, в отличие от существующей классификации, относящих материал к классу литейных сплавов.

Дополнительная холодная обработка вызывает некоторое повышение прочности материала прутка с одновременным снижением пластических характеристик. Причем чем выше степень деформации при волочении, тем в большей мере проявляются эти особенности изменения свойств, особенно прочности.

В частности, например, при суммарном относительном обжатии при волочении  $\epsilon_{\Sigma} = 31~\%$  величина  $\sigma_{B}$  составляет 240...250 МПа, а при  $\epsilon_{\Sigma} = 44~\% - \sigma_{B} = 260...270$  МПа. При этом относительное удлинение  $\delta$  снижается до 3...5 %, а относительное сужение  $\psi$  — до 15...20 %. Таким образом, для получения проволоки диаметром 2...3 мм (такие размеры приняты, например, для сварочной проволоки из сплава AK12) в технологическую схему по ее изготовлению необходимо обязательно включать промежуточный отжиг.

Для подтверждения указанного предположения холоднотянутые прутки диаметром 6 и 5 мм подвергали промежуточному отжигу по режиму: температура отжига 400 °C, время выдержки 1 ч. После его проведения на обоих диаметрах (разница в 1 мм в данном случае играет малую роль) прочность прутков снижалась до значений  $\sigma_{\rm B}=160...170$  МПа, а пластичность, наоборот, повышалась до  $\delta=25...30$  % и  $\psi=45...50$  %. Дальнейший характер изменения свойств проволоки при волочении, проводимом со средним единичным обжатием 10...15 %, в зависимости от суммарного относительного обжатия  $\epsilon_{\Sigma}$  отображен на рис. 6.

Выполнено сопоставление данных механических испытаний полученных прутков и проволоки с результатами исследований [12], основанных на применении при экструзии предварительно горячебрикетированной стружки. Результаты этого сравнения приведены в табл. 2.

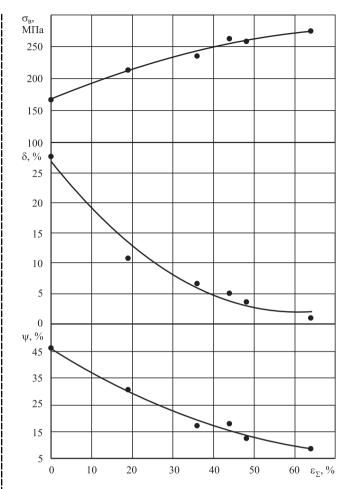


Рис. 6. Изменение механических свойств проволоки из стружки сплава AK12 при растяжении после проведения промежуточного отжига

Существенной разницы в уровнях свойств не выявлено, хотя прослеживается некоторая тенденция в превышении прочностных и пластических характеристик первых над вторыми. Это, по-видимому, связано с тем, что использование во втором случае двойного нагрева (в ходе брикетирования и перед экструзией) оказывает дополнительное термическое воздействие на саму стружку, в результате чего в момент истечения материала через матрицу сопротивление деформации всего объема заготовки будет чуть меньшим.

2. Сравнение механических свойств двух вариантов изготовления прутковой продукции непосредственно после экструзии

Вариант изготовления прутков	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %
Предложенный	169181,5	15,519,5
По [12]	165170	1319

Анализ усредненных величин показал, что по предложенному варианту временное сопротивление разрыву у прутков составляет 175 МПа, что на 5 % выше относительно базы сравнения (167 МПа), а относительное удлинение равно 17,5 %, что на 9 % выше базы сравнения (16 %).

Практическая ценность полученных результатов доказана поставкой образцов проволоки для испытаний в АО "Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева" (г. Железногорск) для проведения опытной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов. В результате опробования установлено, что качество пайки узлов конструкции этого предприятия соответствует нормативным требованиям, а разработанная технология получения проволоки может быть рекомендована для промышленного применения.

#### Выводы

- 1. Реализация методов переработки стружки без применения переплава позволяет получить продукты с достаточно высоким уровнем механических свойств.
- 2. Сравнение двух вариантов переработки стружки с использованием холодного или горячего брикетирования показало, что механические свойства у конечного продукта получаются практически одинаковыми.
- 3. Применение холодного брикетирования вместо горячего позволяет экономить энергозатраты и не допустить дополнительного окисления материала.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ab Rahim S.N., Lajis M.A., Ariffin S.** A Review on Recycling Aluminum Chips by Hot Extrusion Process // 12<sup>th</sup> Global Conference on Sustainable Manufacturing. Procedia CIRP. 2015. Vol. 26. P. 761—766.

- 2. **Shamsudin S., Lajis M., Zhong Z.W.** Evolutionary in Solid State Recycling Techniques of Aluminium: a review. Procedia CIRP. 2016. Vol. 40. P. 256—261.
- 3. **Chiba R., Yoshimura M.** Solid-state recycling of aluminium alloy swarf into c-channel by hot extrusion // Journal of Manufacturing Processes. 2015. Vol. 17. P. 1—8.
- 4. **Haase Matthias, Tekkaya Erman.** Cold extrusion of hot extruded aluminum chips // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 217. P. 356—367.
- 5. Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 171 с.
- 6. **Wang Y., Xu H., Hu M.** at al. Enhanced mechanical properties of a chip-based Al—Si—Cu—Fe alloy with an in-situ emulsion decomposition recycled by solid-state processing // Results in Physics. 2019. Vol. 12. P. 718—724.
- 7. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
- 8. **Возникновение** зон неконтактной деформации в процессе прокатки-прессования пористого прутка / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов, Н.Н. Загиров, Е.В. Иванов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 3. С. 38—41.
- 9. **Моделирование** уплотнения пористого материала в совмещенном процессе прокатки-прессования / А.А. Ершов, Ю.Н. Логинов, Н.Н. Загиров, Е.В. Иванов // Металлург. 2016. № 6. С. 14—17.
- 10. **Технологическая** схема получения лигатурного прутка из стружки силумина, исключающая ее переплав / Н.Н. Загиров, В.И. Аникина, Г.П. Усынина, А.С. Юриков, Е.В. Иванов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. Вып. 1. С. 34—38.
- 11. **Загиров Н.Н., Константинов И.Л., Иванов Е.В.** Разработка технологии изготовления сварочной проволоки СвАК12 из стружковой заготовки // Известия вузов. Цветная металлургия. 2012. № 2. С. 36—41.

Николай Наильич Загиров, канд. техн. наук; Юрий Николаевич Логинов, д-р техн. наук, j.n.loginov@urfu.ru; Евгений Владимирович Иванов; Ринат Рафикович Ризаханов



УДК 621.771.2

**Е.А. Максимов** (ЗАО НТПП "Интрай", г. Челябинск), **Р.Л. Шаталов** (Московский политехнический университет)

### Методика расчета параметров правки листового проката на роликовой правильной машине с роликами различного диаметра

Разработан новый способ правки листового проката, имеющего различное отклонение от плоскости листа по его длине. Проведен расчет геометрических и силовых параметров очага деформации при правке листа на роликовой правильной машине с роликами различного диаметра. Расчеты показали, что при увеличении силы правки от 20 до 100 кН максимальный прогиб листа составляет 1,7...5,5 мм. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента показало, что различие не превышает 10...20 %, что свидетельствует об адекватности модели и о возможности ее практического использования для расчетов параметров правки листового проката путем изгиба на роликовой правильной машине с различными диаметрами роликов.

**Ключевые слова:** правка листового проката; роликовая правильная машина; расчет параметров правки; экспериментальные исследования.

The new method for straightening of the sheet having various deviation from plane of sheet on its length is developed. The calculation of geometrical and power parametres of the deformation zone at sheet straightening on the roller-type straightening machine with various diameters rollers is performed. The calculations showed that at increase in straightening force from 20 to 100 kN, the maximum flexure of sheet is 1.7 to 5.5 mm. Comparison of calculation results with the experiment data showed that difference does not exceed 10...20 % that testifies to adequacy of model and about possibility of its practical use for calculations of parameters of sheet straightening by bending on the roller-type straightening machine with different diameters of rollers.

**Keywords:** sheet straightening; roller-type straightening machine; calculation of straightening parametres; experimental researches.

Неравномерный нагрев заготовок в методических печах, различие диаметров рабочих валков прокатного стана, различие моментов со стороны верхней и нижней трансмиссий главного привода стана и прочие технологические факторы вызывают неконтролируемый изгиб листа по его длине при горячей листовой прокатке. Вследствие этого наблюдается различный изгиб листа по его длине на отдельных участках, т.е. неравномерный дефект формы в виде отклонения от плоскостности по его длине.

Для предотвращения дефектов формы в виде отклонения от плоскостности осуществляют правку листового проката на *роликовых правильных машинах* (РПМ). К недостаткам роликовых правильных машин, работающих по традиционной технологии, следует отнести их пониженную производительность, обусловленную тем, что для получения листа с нормативным отклонением от плоскостности необходимо пропускать лист через РПМ несколько раз.

В настоящее время в теоретических разработках [1—5] обычно принимают допущение о равномерности изгиба листа по его длине на

отдельных участках, т.е. о равномерности дефекта формы в виде отклонения от плоскостности. Кроме того, в конструкции РПМ, как правило, применяют ролики с одинаковыми диаметрами.

*Цель работы* — повышение качества листового проката путем правки листа на роликовой правильной машине с роликами различного диаметра.

В соответствии с ГОСТ 19903—2015 для листового проката правке подвергают листовой прокат с равномерным отклонением от плоскостности A (рис. 1) в диапазоне от 8 до 20 мм.

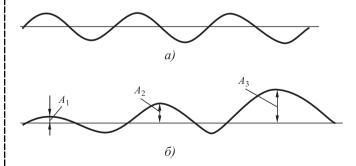


Рис. 1. Равномерное (a) и неравномерное ( $\delta$ ) отклонение от плоскостности листового проката

Измерения показали, что фактически на листе наблюдается неравномерное отклонение от плоскостности [1]. Неравномерные отклонения от плоскостности при правке листа на традиционной РПМ, как правило, не выправляются, так как машина имеет одинаковые диаметры всех рабочих роликов, которые воздействуют на дефект плоскостности с одинаковой кривизной бочек роликов, устраняется только дефект плоскостности, имеющий одинаковое отклонение от плоскостности.

Предложен новый способ правки, который характеризуется тем, что при подаче исходного листа в РПМ, имеющего на трех участках различное отклонение от плоскостности (большее, среднее, меньшее), на первом ролике устраняется меньшее отклонение, на втором ролике — среднее отклонение, на третьем ролике — большее отклонение. Дефект устраняется, так как кривизна роликов противоположна отклонению от плоскостности (изгибу поверхности) исходного листа. На рис. 2 показана схема семироликовой правильной машины.

Крутящий момент на верхнем ролике определяли по формуле

$$M_{\rm Kp} = (M_{\rm H} + M_0) \frac{D_1}{4R},$$
 (1)

где  $M_{\rm H}$  — момент, затрачиваемый на знакопеременный изгиб листа между роликами РПМ;  $M_0$  — начальный изгибающий момент,  $M_0 = \sigma_s \frac{Bh^2}{4}$ ;  $\sigma_s$  — предел текучести листа в исходном состоянии; B, h — ширина и толщина листа соответственно;  $D_1$  — диаметр первого верхнего ролика; R — радиус изгиба листа верхним роликом.

Уравнение для случая выпрямления листа, имеющего в исходном состоянии радиус изгиба неплоскостности  $R_{\pi}$ :

$$M_{\text{kpl}} = (M_{\text{M}} - M_{\text{M}}) \frac{D_1}{4} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_{\text{m}}} \right),$$
 (2)

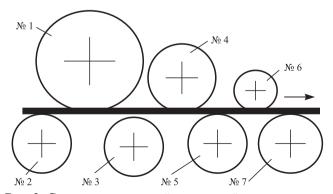


Рис. 2. Схема семироликовой правильной машины

где  $M_{\scriptscriptstyle \rm I}$  — изгибающий момент, соответствующий радиусу изгиба неплоскостности в исходном состоянии.

Крутящий момент, затрачиваемый на преодоление сил трения качения роликов по листу и сил трения на шейках опорных роликов:

$$M_{\text{kp2}} = (P_1 + P_2)\mu + \left(P_1 \frac{d_1}{2} + P_2 \frac{d_2}{2} \frac{D_1}{D_2}\right)f,$$
 (3)

где  $P_1$ ,  $P_2$  — силы на первом верхнем и втором нижнем роликах соответственно;  $d_1$ ,  $d_2$  — диаметры цапф на первом верхнем и втором нижнем роликах соответственно;  $D_2$  — диаметр второго нижнего ролика;  $\mu$  — коэффициент трения скольжения в подшипниках роликов; f — коэффициент трения качения роликов по листу (f = 0,3 мм).

Суммарный крутящий момент:

$$M_{\rm c} = M_{\rm Kpl} + M_{\rm Kp2}.\tag{4}$$

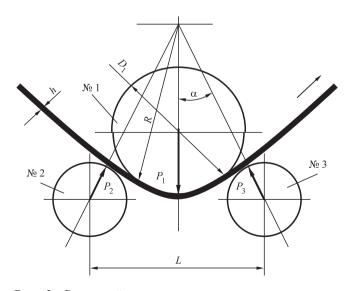
Силы на роликах определяли следующим образом (рис. 3):

— для верхнего ролика большего диаметра

$$P_1 = \frac{M_c}{R \sin \alpha};\tag{5}$$

— для нижнего ролика меньшего диаметра

$$P_2 = \frac{2M_c}{R \operatorname{tg} \alpha}.$$
 (6)



**Рис. 3.** Схема действия сил при правке листа на трех роликах

1. Результаты расчета параметров правки
для листа из стали 45 размерами 6×40×300 мм
для семироликовой правильной машины

<i>P</i> <sub>1</sub> , кН	<i>r</i> , MM	θ, рад	u, mm
20	300	0,010	1,7
50	200	0,014	3,6
100	100	0,020	5,5
Обозначение: <i>r</i> — диаметр ролика.			

Максимальный прогиб листа под действием силы  $P_1$ :

$$u = L\theta, \tag{7}$$

где L — расстояние между опорами;  $\theta$  — угол между продольной осью листа при изгибе и осью листа в исходном состоянии.

Результаты расчета параметров правки для листа из стали 45 размерами  $6\times40\times300$  мм для семироликовой правильной машины приведены в табл. 1. При увеличении силы  $P_1$  от 20 до 100 кH угол  $\theta$  увеличивается от 0,010 до 0,020 рад, максимальный прогиб листа u изменяется от 1,7 до 5,5 мм.

Экспериментальные исследования проводили на образцах из стали 45 длиной  $L_1=300$  мм, шириной B=40 мм, толщиной h=6,0 мм. Изгиб образцов осуществляли на 10-тонной универсальной гидравлической машине в приспособлении в виде двух неподвижных опор, расположенных по краям образца (рис. 4). Максимальный прогиб образца контролировали электронным индикатором MaHR 4336030 с точностью  $\pm 0,1$  мм.

Образцы листов после изгиба показаны на рис. 5.

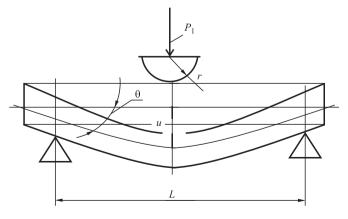


Рис. 4. Схема определения изгиба образцов

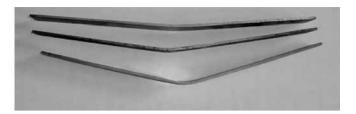


Рис. 5. Образцы листов после изгиба

### 2. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента

<i>P</i> <sub>1</sub> , кН	<i>u*</i> , мм	u, mm	Различие, %
20	1,5	1,7	13,3
50	3,0	3,6	20,0
100	5,0	5,5	10,0
Обозначение: $u^*$ — экспериментальные данные.			

Сравнение результатов расчета с данными эксперимента представлены в табл. 2. При увеличении силы  $P_1$  от 20 до 100 кН максимальный прогиб образцов изменяется от 1,5 до 5,0 мм.

Адекватность математической модели (1)—(7) проверена сравнением результатов расчета с данными эксперимента, при этом различие не превышает 10...20 %, что свидетельствует об адекватности модели и о возможности ее практического использования для расчетов параметров правки листового проката путем изгиба на РПМ с роликами различного диаметра.

Заключение. Разработан новый способ правки листового проката с различным отклонением от плоскости по его длине, преимуществами которого являются повышение качества правки и увеличение производительности РПМ.

Представлена методика расчета геометрических и силовых параметров очага деформации при правке листа на РПМ с роликами различного диаметра.

Расчеты показали, что при увеличении силы  $P_1$  от 20 до 100 кН угол  $\theta$  возрастает от 0,01 до 0,020 рад, а максимальный прогиб листа u — от 1,7 до 5,5 мм.

Экспериментальные исследования, выполненные на образцах из стали 45 длиной  $L_1=300$  мм, шириной B=40 мм, толщиной h=6,0 мм показали, что при увеличении силы  $P_1$  от 20 до 100 кН максимальный прогиб образцов  $u^*$  изменяется от 1,5 до 5,0 мм.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Современная система** регулирования правки полосы изгибом соответственно форме / Ж. Ползер, А. Вольф, Ф. Гогельс, Г. Мюке, Е. Хеслер // Черные металлы. 2009. № 5. С. 41—49.
- 2. **Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М. и др.** Разработка методики определения геометрических параметров металлических листов на роликовых машинах // Производство проката. 2016. № 7. С. 3—8.
- 3. **Недорезов И.В.** Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. Екатерин-бург, 2003. 256 с.
- 4. **Максимов Е.А.** Моделирование расчета технологических параметров роликовых правильных машин с учетом изгиба и износа по длине бочек роликов // Черная металлургия. 2016. № 12. С. 61—67.
- 5. Модернизация роликовой правильной машины для повышения качества толстых стальных листов

- / Е.А. Максимов, Р.Л. Шаталов, Е.П. Устиновский, М.Я. Бровман // Сталь. 2017. № 4. С. 39—44.
- 6. **Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Васильев Ю.С.** Уточнение методики расчета параметров правки толстых листов на роликовой правильной машине // Сталь. 2017. № 1. С. 35—38.
- 7. **Шинкин В.И.** Расчет кривизны стального листа при правке на восьмироликовой машине // Черные металлы. 2017. № 2. С. 39—43.
- 8. **Шинкин В.И.** Расчет изгибающих моментов стального листа и реакций опор рабочих роликов при правке на восьмироликовой машине // Черные металлы. 2017. № 4. С. 49—53.

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

Роман Львович Шаталов, д-р 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, электрофизикохимическим 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

### MATERNAJOBETEHNE N HOBPIE

### MATEP/NA/Jbl

УДК 669.017+621.785

**E.A. Морозова<sup>1</sup>, А.П. Морозов<sup>2</sup>, В.С. Муратов<sup>1</sup>** (<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, <sup>2</sup>АО " Гипровостокнефть, г. Самара)

# Влияние комбинированных воздействий на сопротивление усталости алюминиевых сплавов систем Al—Cu—Mg—Mn и Al—Zn—Cu—Mg

Исследовано влияние термической и пневмодробеструйной обработок, а также дополнительного нагрева (125 °C, 100 ч) на сопротивление усталости алюминиевых сплавов В95 (без термической обработки и в состоянии Т1) и Д16Т. Установлено, что дополнительный нагрев после пневмодробеструйной обработки снижает сопротивление усталости сплава В95 (в обоих состояниях), сопротивление усталости сплава Д16Т при этом повышается.

**Ключевые слова:** термическая обработка; пневмодробеструйная обработка; дополнительный нагрев; микротвердость; микроструктура; сопротивление усталости.

V95 (without heat treatment and T1 state) and D16T alloys fatigue resistance after heat treatment, air shot-blasting treatment and additional heating (125 °C, 100 h) are studied. It is established that additional heating after air shot-blasting treatment leads to lowering V95 (in both states) alloy fatigue resistence; the D16T alloy fatigue resistance is increased.

**Keywords:** heat treatment; air shot-blasting treatment; additional heating; microhardness; microstructure; fatique resistance.

В процессе изготовления деформированных полуфабрикатов алюминиевые сплавы испытывают последовательный ряд воздействий (подвергаются комбинированной обработке), включающий в себя кристаллизацию при литье слитков, гомогенизацию, пластическую деформацию (при прокатке, прессовании, штамповке), термическую обработку (закалку, старение, рекристаллизационный отжиг), а в некоторых случаях и поверхностную упрочняющую обработку. В ходе последующей эксплуатации изделий сплавы также испытывают различные воздействия — нагревы, силовые нагрузки и т.д. При этом каждый этап формирует структуру сплава и определяет его работоспособность [1-4].

Исследовано влияние комбинированной обработки (термическая обработка—поверхностное упрочнение—дополнительный нагрев) на

сопротивляемость усталости сплавов систем Al—Cu—Mg—Mn (сплав Д16) и Al—Zn—Cu—Mg (сплав В95). Сопротивляемость усталости является важнейшим показателем работо-способности авиационных материалов [5, 6]. Исследования выполнены на продольных образцах, вырезанных из прессованных прутков (температура нагрева слитков под прессование 380...400 °C) сплавов Д16Т, В95 (без термической обработки) и В95Т1.

Химический состав исследуемых сплавов, % мас.:

Д16T — 4,76 Cu; 0,79 Mn; 1,39 Mg; 0,4 Fe; 0,29 Si; 0,10 Zn; 0,045 Ni; 0,05 Ti;

В95 и В95Т1 — 6,22 Zn; 2,4 Mg; 1,6 Cu; 0,46 Mn; 0,4 Fe; 0,31 Si; 0,17 Cr; 0,047 Ni; 0,05 Ti.

Режимы термической обработки сплава Д16Т — закалка в воде с температуры ( $500 \pm 5$ ) °C, естественное старение; сплава B95T1 — закалка

в воде с температуры (470  $\pm$  5) °C, искусственное старение 140 °C, 15 ч.

Поверхностное упрочнение проводили с использованием *пневмодробеструйной обра- ботки* (ПДО) рабочей поверхности образцов для усталостных испытаний стальной дробью диаметром 1,5...2 мм при давлении воздуха 0,25 МПа и длительности обработки 10 мин.

Режим *дополнительного нагрева* (ДН): температура 125 °C, выдержка 100 ч.

Испытания цилиндрических образцов на усталость при чистом изгибе выполняли в соответствии с ГОСТ 25.502—79; цикл нагружения — симметричный. База испытаний  $1 \cdot 10^7$  циклов. Испытания с вращением образца проводили на машинах МУИ-6000.

На рис. 1 показана поверхность рабочей части усталостного образца после ПДО. Параметр шероховатости поверхности после обработки составлял в среднем для сплава Д16Т  $Rz=23,18\,$  мкм, для сплава В95 —  $Rz=22,43\,$  мкм. Шероховатость определяли на приборе Surftest SJ-201P. Активный перенос железа из стальной дроби на обрабатываемую поверхность при используемых режимах ПДО не обнаружен.

В табл. 1 приведены результаты усталостных испытаний образцов с различными вариантами обработки. Установлено, что в состоянии до ПДО и после нее лучшей сопротивляемостью усталости обладает сплав В95Т1. Дополнительный нагрев значительно снижает уровень сопротивляемости усталости этого сплава, а у Д16Т он повышается и нагрев делает сплав наиболее работоспособным.

На усталостных образцах после испытаний были выделены (рис. 2) две зоны — периферийная (зона 1), которая не подвергалась ПДО, и рабочая (зона 2), в которой на ряде образцов

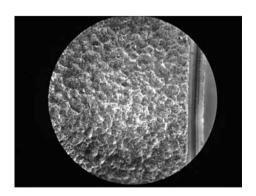


Рис. 1. Поверхность образца из сплава Д16Т после ПДО

1. Результаты испытаний образцов на усталость

Сплав, состояние	Обработка образцов	Напряжения, МПа	Доля разрушенных образцов, %
Д16Т	Без ПДО	82,5 150180	0 80
	пдо	115130 150180	0 60
	пдо + дн	150180	0
B95	Без ПДО	115130	100
	пдо	115130 150180	20 100
	пдо + дн	115130	100
B95T1	Без ПДО	107,5 150180	0 66,7
	пдо	115130 150180	0 40
	пдо + дн	150180	73,3

Примечание. В каждом интервале напряжений испытано 15 образцов: 5 образцов при максимальном напряжении, 5 — при среднем и 5 — при минимальном напряжении.

реализовывалось поверхностное упрочнение. В указанных зонах измеряли микротвердость поверхностных слоев образцов по Кнупу НК.

В зоне 1 шаг измерения составлял 2000...3000 мкм, а измерения микротвердости в зоне 2 осуществляли в направлении от области разрыва образца с шагом 100...300 мкм (первые три замера) и 700...800 мкм (последующие замеры) на длине 17...18 мм.

Результаты измерения микротвердости приведены в табл. 2. Выявлено, что микротвердость в зоне 1, т.е. в неупрочненной ПДО зоне, имеет однородный характер. Микротвердость сплава В95 составляет 190...265 НК,



Рис. 2. Зоны измерения микротвердости образцов

2. Результаты измерения микро	отвердости по Кнуг	Пy
-------------------------------	--------------------	----

Сплав, состояние	Обработка образцов	Микротвердость, НК		
		в зоне 1	в зоне 2	
Д16Т	Без ПДО	140250	145250	
	ПДО	140240	200700	
	пдо+дн	150245	180445	
B95	Без ПДО	190265	185265	
	ПДО	190285	2452460	
	пдо+дн	210285	200285	
B95T1	Без ПДО	290340	285345	
	ПДО	285340	305650	
	пдо+дн	255310	260310	

сплава Д16Т — 140...250 НК, а сплава В95Т1 — 290...340 НК. Неупрочненные ПДО образцы в зоне 2 (рабочая часть образца) имеют примерно такие же значения микротвердости.

Рассмотрим влияние пневмодробеструйной обработки на характер изменения микротвердости. В связи с неровностью рельефа на всех исследуемых образцах наблюдается увеличенный разброс значений микротвердости. При этом для сплава В95 некоторые значения микротвердости образца в зоне 2 достигают 2460 НК. На образцах из сплавов Д16Т и В95Т1 после ПДО также повышается микротвердость, но в меньшей степени (см. табл. 2).

Рост микротвердости связан с наклепом поверхностного слоя, а также с формированием в нем сжимающих остаточных напряжений, что показано в работах [7, 8]. Последнее должно тормозить распространение усталостных трещин, что подтверждается наличием в упрочненном поверхностном слое нераспространяющихся трещин (рис. 3). Упрочненный слой четко виден и на поверхности изломов

других образцов после ПДО. На изломах зона долома имеет вязкое строение, выявляется и область ручьистого излома.

На рис. 4 приведено распределение микротвердости по глубине (L — расстояние от поверхности) поперечного шлифа для одного из образцов из сплавов В95 и Д16Т после ПДО. Глубина повышенной микротвердости составляет 500...600 мкм,

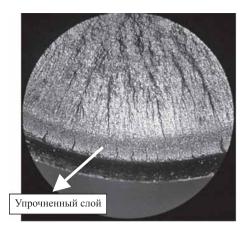
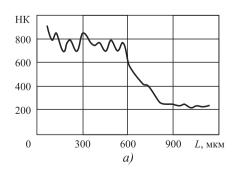


Рис. 3. Нераспространяющиеся трещины в поверхностном упрочненном слое

что совпадает с глубиной области сжимающих остаточных напряжений в этих сплавах после поверхностного упрочнения, определенной в [6]. Отмеченное ранее резкое упрочнение сплава В95 при ПДО связано с его большей способностью к деформированию, поскольку он находится в нетермоупрочненном состоянии.

Дополнительный нагрев образцов после ПДО заметно снижает микротвердость всех рассматриваемых сплавов. Наиболее интенсивно микротвердость уменьшается в сплаве В95, наименее — в сплаве Д16Т. При этом сопротивляемость усталости сплава Д16Т в состоянии обработки ПДО + ДН максимальна (см. табл. 1). Авторы [9] связывают снижение микротвердости в процессе температурных выдержек после ПДО с перераспределением и релаксацией остаточных напряжений. Необходимо учитывать, что при длительных температурных выдержках протекают процессы изменения фазового состояния сплава, например, в естественно-состаренном сплаве Д16Т



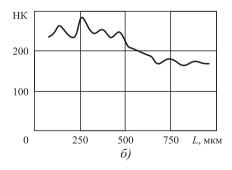


Рис. 4. Распределение микротвердости по Кнупу НК по глубине поперечного шлифа L образцов сплавов В95 (a) и Д16Т ( $\delta$ )

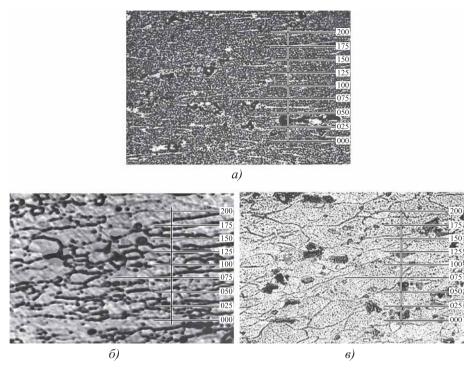


Рис. 5. Поверхностная (a), основная (б) и глубинная (в) зоны в поперечном сечении образца из сплава Д16Т после ПДО. Цена деления шкалы 25 мкм. ×400

(в котором присутствуют зоны Гинье-Престона) могут появляться выделения промежуточных фаз. При этом твердость сплава уменьшается, а усталостные характеристики улучшаются.

Отсутствие упрочняющих выделений (формируемых при старении после закалки) в структуре сплава В95 предопределяет его низкие показатели сопротивляемости усталости.

В поперечном сечении образцов в состояниях ПДО и ПДО + ДН исследована микроструктура сплавов Д16Т (рис. 5) и В95.

Установлено, что образцы после ПДО имеют три характерные зоны:

1) поверхностная зона (см. рис. 5, *а*) представляет собой темно-травящийся слой. В этой зоне формируется высокая плотность дислокаций за счет значительной степени наклепа. При этом сплав В95 имеет более темную по-

верхностную зону. Глубина этого слоя составляет примерно 540...600 мкм для сплава В95 (см. рис. 4, a) и около 480...500 мкм для сплава Д16Т (см. рис. 4,  $\delta$ );

- 2) основная зона (см. рис. 5,  $\delta$ ) протяженностью около 4 мм. Это зона, в которой также большое количество дислокаций, которые в основном сконцентрированы по границам зерен. Зерна имеют вытянутую форму по образующей цилиндрического образца, приобретенную вследствие деформации при ПДО;
- 3) глубинная зона (см. рис. 5, в), в которую плавно переходит основная зона. Эта область характеризуется сравнительно небольшой

плотностью дислокаций. Зерна имеют форму, образованную в ходе получения прессованного полуфабриката, из которого изготовлены образцы.

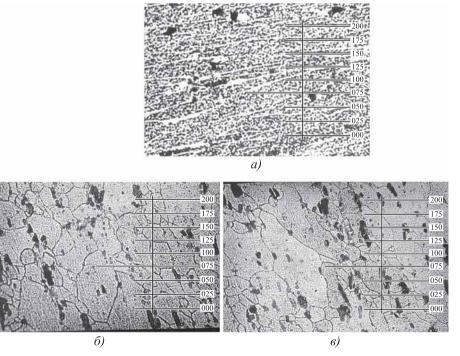


Рис. 6. Поверхностная (a), основная (б) и глубинная (в) зоны в поперечном сечении образца из сплава Д16Т после ПДО + ДН. Цена деления шкалы 25 мкм.  $\times 400$ 

Влияние ДН на изменение структуры сплава Д16Т показано на рис. 6. Поверхностная зона становится более светлой (см. рис. 6, a), так как нагрев до 125 °C в течение 100 ч приводит к снижению плотности дислокаций. В основной зоне также уменьшается травимость границ зерен (см. рис. 6,  $\delta$ ).

#### Выводы

- 1. Наилучшей сопротивляемостью усталости в интервале напряжений 150...180 МПа после пневмодробеструйной обработки поверхности обладает сплав В95Т1 (в сравнении со сплавами Д16Т и В95). Дополнительный нагрев сплавов после пневмодробеструйной обработки до температуры 125 °C в течение 100 ч отрицательно влияет на сопротивляемость усталости сплава В95Т1, но улучшает ее у сплава Д16Т.
- 2. Пневмодробеструйная обработка образцов создает на поверхности сплава интенсивно травящийся слой повышенной микротвердости толщиной 480...500 мкм (сплав Д16Т) и 540...600 мкм (сплав В95), в котором сформированы сжимающие остаточные напряжения и состояние наклепа, что тормозит развитие зародившихся усталостных трещин.
- 3. Дополнительный нагрев сплавов после пневмодробеструйной обработки приводит к релаксации остаточных напряжений и уменьшению степени наклепа в поверхностном слое, что снижает сопротивляемость усталости (в сплаве B95T1), однако изменения фазового состава сплава позволяют ее улучшить (в сплаве Д16Т).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Муратов В.С., Юдаев Д.П.** Влияние дополнительного старения при технологических нагревах на механические свойства и микроструктуру листовых

- полуфабрикатов из сплава 1151 // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 11. С. 41—43.
- 2. **Получение** литых и деформированных заготовок из алюминиевых сплавов / В.С. Муратов, Е.А. Морозова, Н.В. Дворова, О.И. Закопец // Металлургия машиностроения. 2012. № 3. С. 36—38.
- 3. **Кондратьев С.Ю., Зотов О.Г., Швецов О.В.** Структурная стабильность и изменение свойств алюминиевых сплавов Д16 и 1953 в процессе изготовления и эксплуатации бурильных труб // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 10 (700). С. 15—21.
- 4. **Муратов В.С., Трефилова Н.В., Хамин О.Н.** Формирование поверхностной твердости деформируемых алюминиевых сплавов для обеспечения нанесения высококачественных ионно-плазменных покрытий // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 3. С. 41—44.
- 5. **Трещиностойкость** авиационных материалов в процессе испытания на усталость / В.С. Ерасов, Г.А. Нужный, А.В. Гриневич, А.Л. Терехина // Труды ВИАМ электронный научный журнал. 2013. № 10. URL: http:// viam-works.ru/ ru/articles.
- 6. **Пачурин Г.В.** Структурная повреждаемость и сопротивляемость усталости сплава В95пчТ2 при различных температурах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 3. С. 28—33.
- 7. **Исследование** усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163Т и В95о.ч. Т2 после поверхностного упрочнения / А.В. Гриневич, Ю.С. Румянцева, Л.В. Морозова, А.Л. Терехин // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S4. С. 93—102.
- 8. **Кирпичев В.А., Иванов Д.В., Саушкин М.Н.** Остаточные напряжения в образцах из сплавов В95 и Д16Т после пневмодробеструйной обработки // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-хим. науки. 2009. № 2 (19). С. 260—263.
- 9. **Остаточные** напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, В.Б. Иванов. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 64 с.

Елена Александровна Морозова, канд. техн. наук; Андрей Павлович Морозов, канд. техн. наук; Владимир Сергеевич Муратов, д-р техн. наук, ftf@samgtu.ru



УДК 62-233.3/.9

**А.А. Жуков** (Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева), **А.П. Навоев** (ООО "Компания Дизель", г. Тутаев)

## Методика выбора температурно-временных режимов двухступенчатой низкотемпературной цементации зубчатых колес привода агрегатов двигателей внутреннего сгорания

Приведена методика, по которой можно осуществлять выбор режимов двухступенчатой цементации с учетом условий эксплуатации детали, характера и величины действующих нагрузок, назначенных показателей качества цементованного слоя. В зависимости от характера и степени нагружения цементованного слоя предложено зубчатые колеса условно разделить на четыре категории работоспособности с различным характером распределения микротвердости по глубине слоя. Это позволит назначать оптимальные режимы цементации, исходя из выбранной категории работоспособности.

**Ключевые слова:** зубчатые колеса; низкотемпературная цементация; категории работоспособности; цементованный слой; микротвердость; показатели качества цементованного слоя; температурно-временные режимы цементации.

The method by which can select the two-stage carburizing regimes, taking into account the operating conditions of the part, the nature and size of the actual loads, and designated quality indicators for the cemented layer are presented. Depending on the nature and loading degree of the cemented layer, it is proposed that gears be conventionally divided into four categories of working capacity with different patterns of microhardness distribution over the depth of the layer. This will allow you to more correctly assign carburizing regimes, based on the selected working capacity category.

**Keywords:** gear wheels; low-temperature carburizing; categories of working capacity; cemented layer; microhardness; indicators of quality of cemented layer; temperature and time regimes of carburizing.

Повышение давления впрыска топлива в цилиндры ДВС, необходимое для обеспечения экологических требований по дымности и токсичности отработавших газов, неизбежно приводит к увеличению затрат мощности на привод топливного насоса высокого давления (ТНВД) дизельных двигателей, а следовательно, к увеличению механической нагрузки на детали механизма привода ТНВД [1—3].

Двигатели семейства ЯМЗ-840 производства ОАО "Тутаевский моторный завод (ОАО "ТМЗ") первоначально разрабатывались с зубчатыми колесами (ЗК) привода агрегатов, упрочняемыми азотированием. С переходом на топливную аппаратуру нового поколения с повышенной энергетикой впрыска (ТНВД типа "Компакт-40") азотированные зубчатые колеса перестали в полной мере обеспечивать требованиям по их работоспособности и надежности. По этой причине был осуществлен переход на более эффективный метод упрочнения высоконагруженных зубчатых колес — цементацию. Однако с введением цементации

появились проблемы технологического характера: коробление деталей, введение чистового шлифования после термической обработки, дефекты цементации (крупное зерно, цементитная сетка, избыточная твердость), а также нестабильность и большой разброс показателей качества цементованного слоя ЗК [4, 5].

Многие цементованные ЗК имеют малый ресурс из-за контактного разрушения и усталостных поломок [5]. При этом эти ЗК соответствуют техническим требованиям по поверхностной твердости и глубине слоя, но характер распределения твердости по глубине отличается от зависимости, регламентированной ГОСТ 21354—87.

Анализ результатов измерения глубины цементованного слоя на образцах, вырезанных из зубчатых колес ОАО "ТМЗ", показал, что все образцы (25 шт.) по глубине слоя соответствуют техническим требованиям. Однако требуемый характер распределения микротвердости по глубине цементованного слоя согласно рекомендациям ГОСТ 21354—87 обеспечивается

только на 27 % образцов [5]. Таким образом, зубчатые колеса, у которых характер распределения микротвердости по глубине слоя не соответствует установленным рекомендациям, не могут обеспечить требуемую работоспособность изделия в целом, поэтому для них необходима дополнительная (исправительная) термическая обработка.

Причины значительной дисперсии качества и работоспособности цементованных зубчатых колес многочисленны и разнообразны; при этом они могут иметь конструкционный, технологический и эксплуатационный характер. Поэтому вопрос повышения стабильности показателей качества цементованных ЗК, а следовательно, и обеспечения высокой надежности для высоконагруженных ЗК привода ТНВД является актуальным.

Обеспечение стабильного качества цементованных ЗК прежде всего зависит от правильного определения температурно-временных режимов цементации, которые должны обеспечить требуемые показатели качества цементованного слоя. В работе [6] показано, что комплексное решение данной проблемы возможно на основе использования нового методологического подхода — инженерии поверхности.

Эти обстоятельства обусловили основные направления данной статьи, посвященной вопросам обеспечения стабильности качества цементованных деталей, при минимальных затратах на проведение технологического процесса цементации, за счет использования предлагаемой методики определения температурно-временных режимов двухступенчатой цементации, основные теоретические положения которой изложены в работах [7—11].

В дизельных двигателях привод ТНВД, осуществляющий нагнетание топлива к форсункам под высоким давлением, как правило, производится зубчатыми колесами. На рис. 1 представлена кинематическая схема привода агрегатов двигателей семейства ЯМЗ-840 [5]. Все зубчатые колеса прямозубые с модулем m=3, изготовлены из стали 15ХГН2ТА, цементованные на глубину 0,9...1,2 мм.

Максимальные контактные и изгибные напряжения имеет промежуточная шестерня 2Б (см. рис. 1) с наименьшими размерами. Промежуточная шестерня 2Б входит в зацепление с шестерней 3 распределительного вала, с до-

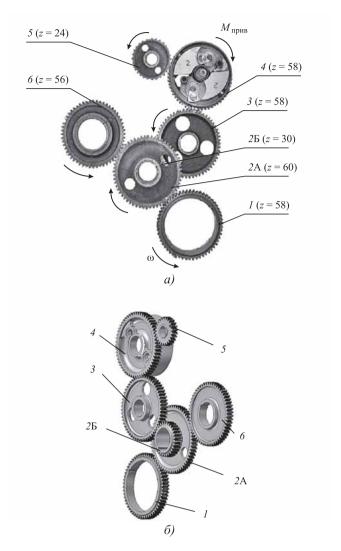


Рис. 1. Конструкторская схема (a) и твердотельная модель (б) механизма привода агрегатов двигателей семейства ЯМЗ-840\*:

1- шестерня КВ; 2- блок промежуточных шестерен: 2A- промежуточная шестерня привода распределительного вала (РВ) с числом зубьев z=60; 2b- промежуточная шестерня привода распределительного вала с числом зубьев z=30 (закрыта шестерней 2A, поэтому видна только небольшая часть ее зубчатого венца); 3- шестерня распределительного вала; 4- шестерня привода THBД; 5- шестерня пневмокомпрессора; 6- шестерня привода насоса гидроусилителя рулевого управления (устанавливается только на автомобильные модификации двигателей)

статочно высокими контактными напряжениями. Максимальные значения (незначительно отличающиеся друг от друга) изгибных напряжений имеют шестерни 3 и 2Б. Промежуточная шестерня и шестерня распределительного вала являются деталями, по которым опреде-

<sup>\*</sup> Названия элементов привода приняты по терминологии руководства по эксплуатации "Двигатели ЯМЗ-8423.10, ЯМЗ 8482.10. Руководство по эксплуатации 8423.3902150ИЭ".

ляют допускаемый момент сопротивления для всего привода агрегатов, поскольку в них возникают максимальные напряжения [1, 3].

Действующие контактные напряжения для некоторых ЗК превышают допустимые, к ним относятся ЗК (шестерня) 2Б, шестерня 3 распределительного вала и ЗК (шестерня) 4. Несмотря на различные действующие напряжения в различных зубчатых зацеплениях привода агрегатов, для всех ЗК задается одинаковая глубина упрочненного слоя. Это объясняется унификацией технологического процесса упрочнения всех ЗК, что определяет избыточность запаса прочности некоторых ЗК (например, 1 и 2A) и приводит к нерациональному использованию материалов и к повышенным технико-экономическим затратам. Более рациональным является дифференцированный выбор индивидуальных технологических режимов цементации для определенной группы ЗК, работающих в наиболее близких условиях по кинематическим и напряженно-деформационным показателям, а следовательно, склонным к одним и тем же видам разрушения цементованного слоя.

В работе [6] указано на необходимость использования новых более эффективных показателей качества цементованного слоя с учетом механизма, характера и вида разрушения слоя. Для практического обеспечения этих показателей необходимы совершенствование традиционных технологических процессов цементации и разработка новых. Например, двухступенчатая низкотемпературная цементация, отличительной особенностью которой является ускоренная диффузия атомов углерода в области температур полиморфных превращений в стали по сравнению с аустенитным состоянием [12, 13].

По результатам выполненных исследований предложены два способа двухступенчатой цементации стали в области температур критических точек  $Ar_1$  и  $Ar_3$  стали [7, 11].

Первый способ заключается в нагреве стали выше точки  $Ac_3$ , выдержка при этой температуре в течение 2 ч для формирования аустенитного слоя определенной толщины, последующее охлаждение до выбранной температуры в интервале  $Ar_3...Ar_1$  и выдержка 2 ч для окончательного формирования цементитного слоя.

Второй способ цементации заключается в нагреве стали выше точки  $Ac_3$  для получения аустенитной структуры, незначительной выдержке не более 5...10 мин и последующем охлаждении до выбранной температуры в интервале  $Ar_3...Ar_1$  и выдержке 1...3,5 ч.

Так как в предлагаемых способах цементации основной процесс формирования цементованного слоя происходит при температуре существенно ниже температуры аустенитного состояния (по традиционной технологии), поэтому предложенные способы правильно называть двухступенчатая низкотемпературная пементация.

Исследования низкотемпературной цементации (НТЦ) и ее комбинации с другими способами показывают, что открываются новые возможности достижения показателей качества цементованного слоя при одновременном снижении затрат ресурсов и времени насыщения. Подбирая параметры технологического процесса, такие как время насыщения и температуру, можно получить требуемые параметры цементованного слоя, которые определяются условиями работы упрочняемых деталей.

Исходя из полученных результатов исследований НТЦ, требуемых свойств цементованного слоя деталей, показателей качества поверхностного слоя можно подобрать тот или иной режим НТЦ. Из режимов НТЦ можно выделить четыре категории. Каждая категория режимов обеспечивает свой диапазон значений параметров цементованного слоя. Выбор требуемых параметров цементованного слоя и их значений обусловлен предъявляемыми к упрочняемым деталям физико-механическими свойствами, которые будут зависеть от условий эксплуатации и режимов нагружения.

Детали машин даже одного агрегата или устройства работают при разных режимах нагружения, а также при различных контактных и изгибных нагружениях. Детали, испытывающие воздействие высоких контактных напряжений, необходимо цементировать на глубину, полностью обеспечивающую восприятие глубинных касательных напряжений, кривая распределения твердости по глубине для тяжелонагруженных деталей должна обладать положительной кривизной и соответствовать ГОСТ 21354—87.

Другие детали имеют большую площадь контакта, но в результате совершения воз-

вратно-поступательных движений подвергаются износу. Одним из способов его предотвращения или снижения интенсивности является повышение твердости поверхности, значение которой соизмеримо с твердостью сопряженных деталей. Некоторые детали подвергаются воздействию знакопеременных напряжений, снижающих их предел усталости. Для них можно увеличивать общую прочность поверхностного слоя для повышения его прочности и выносливости.

Задачу обеспечения широкой номенклатуры физико-механических свойств поверхностного слоя деталей в зависимости от характера их нагружения предложено решить с использованием технологии двухступенчатой низкотемпературной цементации.

Можно выделить следующие категории работоспособности (рис. 2), которые обеспечиваются при проведении НТЦ и ее совместном проведении с другими способами цементации.

**1-я категория.** Для данной категории характерным является глубина слоя с высокой твердостью (до 59...60 HRC) — 0,1...0,2 мм, площадки с положительной кривизной на кривой

HVHV(HRC) (HRC) 59...60 HRC 59...60 HRC 30...45 HRC 30...45 HRC 0,2...0,4 мм 0,1...0,2 мм z, MM z. MM *6*) a)ΗV HV(HRC) (HRC) 59...60 HRC 59...60 HRC 30...45 HRC 30...45 HRC 0,5...0,7 мм z, MM Z, MM 2) в)

Рис. 2. Характер распределения микротвердости в зависимости от категории работоспособности 1-4 ( $a-\epsilon$ ) с учетом условий эксплуатации деталей

распределения твердости нет или она выражена не ярко, может также иметь круто падающую характеристику. Таким распределением твердости могут обладать детали, не испытывающие высокие контактные напряжения, повышение твердости поверхности, как правило, необходимо для снижения износа и повышения прочности, выносливости поверхности и приповерхностных слоев.

Для 1-й категории при использовании низколегированной стали оптимальным будет режим с применением только НТЦ при минимальной температуре (920 °C, 15...20 мин и 600 °C, 2 ч), для низкоуглеродистой стали — это также режим НТЦ при минимально возможной температуре (920 °C, 15...20 мин и 600 °C, 2 ч).

**2-я категория.** Для данной категории характерным является глубина слоя с высокой твердостью (до 59...60 HRC) — 0,2...0,4 мм, имеется площадка с положительной кривизной на кривой распределения твердости. Твердость изменяется до твердости сердцевины плавно и, как правило, должна соответствовать ГОСТ 21354—87 без существенного запаса по

твердости. Таким распределением твердости должны обладать детали, испытывающие высокие контактные напряжения, при этом повышение твердости поверхности обусловлено необходимостью обеспечения износостойкости, повышения прочности и выносливости поверхности и приповерхностных слоев.

Для 2-й категории для низколегированной стали наиболее оптимальным будет режим при минимальных значениях температуры и времени на первой ступени (920 °C, 15...20 мин) и последующая ступень НТЦ (680...660 °C, 2 ч), для низкоуглеродистой стали — это также режим НТЦ (920 °C, 15...20 мин и 680 °C, 2 ч).

**3-я категория.** Для данной категории характерным является глубина слоя с высокой твердостью (до 59...60 HRC) — 0,5...0,7 мм, имеется большая площадка с положительной

кривизной на кривой распределения твердости. Распределение микротвердости по глубине слоя обеспечивает требования ГОСТ 21354—87. Таким распределением твердости должны обладать детали, испытывающие значительные контактные напряжения, в особо ответственных соединениях, испытывающих ударные нагрузки.

Для 3-й категории для низколегированной стали оптимальным будет двухступенчатый режим: первая ступень (920 °C, 2 ч) и вторая ступень (620 °C, 2 ч), а для низкоуглеродистой стали — режим: 920 °C, 15...20 мин и 660 °C, 2 ч.

**4-я категория.** Для данной категории характерным является отсутствие слоя с высокой твердостью. Твердость поверхности ниже 59...60 HRC. Кривая распределения твердости не имеет площадки с положительной кривизной. Твердость изменяется плавно до твердости сердцевины. Таким распределением твердости могут обладать детали, испытывающие знакопеременные напряжения и требующие повышенного сопротивления усталости за счет упрочненного поверхностного слоя на поверхностях, не испытывающих высоких контактных напряжений; для деталей, подвергаемых трению в масляной ванне, для валов с неподвижными деталями.

Для 4-й категории для низколегированных и низкоуглеродистых сталей режимы НТЦ одинаковы: 920 °C, 15...20 мин и 600 °C, 2 ч.

Таким образом, исходя из требуемых условий работы деталей и свойств цементованного слоя, можно выбрать соответствующую категорию работоспособности, а по ней — наиболее соответствующий режим двухступенчатой цементации.

По результатам накопленных данных, полученных при исследованиях режимов НТЦ, а также проведенных расчетов на прочность ЗК привода агрегатов ДВС предложена следующая методика выбора режима НТЦ, которая представлена в виде блок-схемы на рис. 3. В соответствии с блок-схемой выбор режима осуществляется по следующему алгоритму:

- 1. Определение условия эксплуатации упрочняемых деталей.
- 2. Расчет действующих на деталь сил и определение характера их действия.
- 3. Расчет напряжений в детали по аналитическим зависимостям или с помощью про-

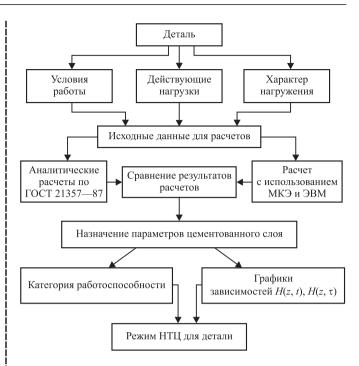


Рис. 3. Блок-схема алгоритма выбора температурновременных режимов НТЦ при заданных условиях нагружения упрочняемой детали

грамм, реализующих метод конечных элементов. Определение минимальной глубины цементованного слоя, удовлетворяющей условиям прочности при действующих нагрузках и характера их действия. Задается минимально допустимое значение падения твердости на глубину, соответствующую 1/3 расстояния от поверхности. Если деталь подвергается шлифованию после цементации, то необходимо увеличить минимальную глубину цементованного слоя на величину припуска на обработку.

- 4. Определение по результатам расчета действующих по глубине слоя напряжений требуемого характера распределения твердости в зависимости от расстояния от поверхности, эффективной и полной глубины цементованного слоя, твердости поверхности и сердцевины.
- 5. Выбор необходимой категории работоспособности и соответствующей ей наиболее характерной зависимости распределения микротвердости.
- 6. Выбор соответствующего режима двухступенчатой НТЦ для определенной группы деталей, используя приведенные рекомендации для различных категорий работоспособности или графические зависимости (рис. 4, 5)

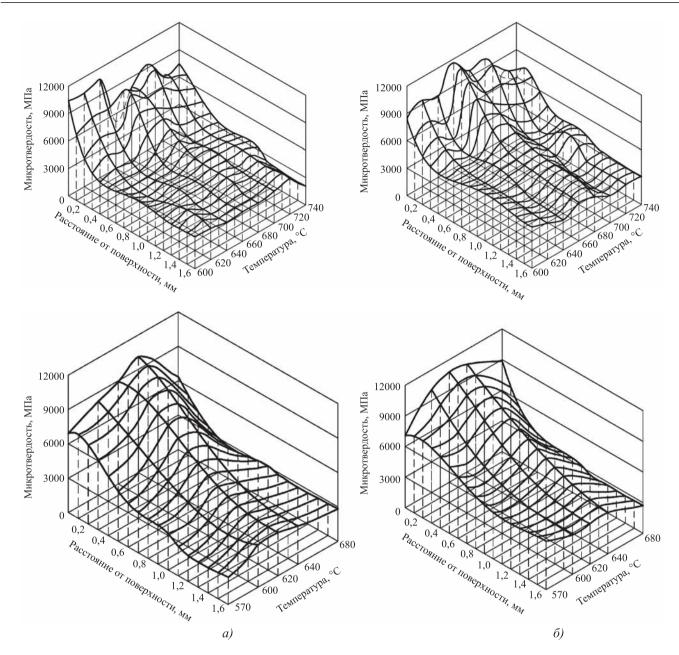


Рис. 4. Изменение микротвердости по глубине в зависимости от температуры:  $a-15\mathrm{X}\Gamma\mathrm{H}2\mathrm{TA};\ b-\mathrm{Ct}3$ 

Заключение. Предложен принцип группировки зубчатых колес в зависимости от категории работоспособности с характерным распределением микротвердости по глубине цементованного слоя.

Технологические и металлофизические особенности двухступенчатой низкотемпературной цементации позволяют обеспечить требуемый комплекс показателей качества цементуемого слоя, включая распределение микротвердости, следовательно, обеспечение стабильного каче-

ства и работоспособности ЗК. Поэтому одно из направлений инженерии цементованной поверхности — дальнейшее изучение диффузионных и термодинамических процессов двухступенчатой НТЦ и совершенствование технологии ее практического использования.

Практическая реализация предлагаемой методики на основе анализа экспериментальных и расчетных данных является примером решения одной из задач инженерии поверхности цементуемых зубчатых колес.

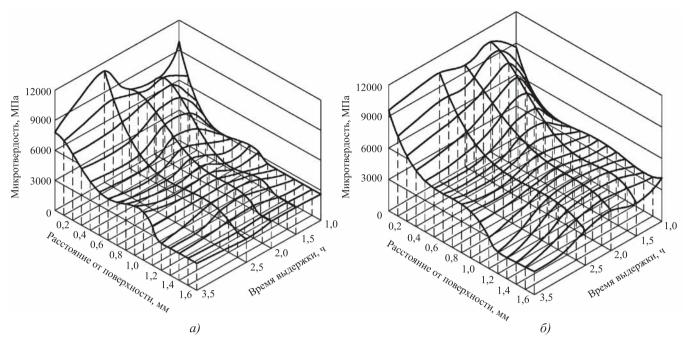


Рис. 5. Изменение микротвердости по глубине в зависимости от времени выдержки при температуре 680 °C: a-15X $\Gamma$ H2TA;  $\delta-$ CT3

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Жуков А.А., Навоев А.П.** Напряженное состояние зубчатых колес механизма привода агрегатов дизельных двигателей // Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве: тез. докл. Российской науч.-техн. конф. 2007. Т. 2. С. 259—263.
- 2. **Жуков А.А., Навоев А.П.** Взаимосвязь между напряжениями в зубчатых зацеплениях шестерен и затратами мощности на привод топливного насоса дизельных двигателей // Вузовская наука региону: материалы пятой Всероссийской науч.-техн. конф. В 2 т. 2007. Т. 1. С. 69—72.
- 3. **Влияние** повышения давления впрыска топлива на напряженное состояние зубчатых колес привода дизеля / А.А. Жуков, А.П. Навоев, В.А. Жуков, С.В. Корытов // Вестник машиностроения. 2009. № 2. С. 18—22.
- 4. **Жуков В.А., Корытов С.В., Навоев А.П.** Влияние параметров топливоподачи в дизелях на выбор упрочняющей обработки зубчатых колес механизма привода агрегатов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 5. С. 38—43.
- 5. Особенности работы, процессы упрочнения, структура, свойство и качество стальных зубчатых колес привода агрегатов двигателей внутреннего сгорания / А.П. Навоев, А.А. Жуков, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 212 с.
- 6. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
- 7. **Пат. 2463380.** Способ цементации со ступенчатыми изотермическими выдержками в области температур полиморфного превращения / Б.В. Фокин, А.П. Навоев. Опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.

- 8. **Навоев А.П.** Ускоренная цементация тяжелонагруженных зубчатых колес в состоянии предпревращения // Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., 19—21 марта 2013 г. "Ремонт. Восстановление. Реновация". Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. 216 с. С. 90—91.
- 9. Навоев А.П., Жуков А.А. Применение низкотемпературной дополнительной цементации для исправления дефектов упрочняющей обработки зубчатых колес // Современные автомобильные материалы и технологии: сб. статей VII Междунар. науч.-техн. конф. / ред. кол.: отв. Е.В. Агеев и др.; Юго-Зап. гос. ун-т, Курск, 2015. С. 143—149.

  10. Жуков А.А., Навоев А.П. Применение цементации
- 10. **Жуков А.А., Навоев А.П.** Применение цементации в интервале температур полиморфного превращения для энергосберегающего упрочнения при восстановлении деталей машин // Материалы междунар. науч.-практ. конф. "Машиностроение: Инновационные аспекты развития". СПбФ НИЦ МС, 2018. С. 106—109.
- 11. **Жуков А.А., Навоев А.П., Фокин Б.В.** Энергосберегающая двухступенчатая цементация // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. 2018. № 2 (45). С. 160—167.
- 12. **Навоев А.П., Фокин Б.В., Жуков А.А.** Влияние фазового превращения на диффузию в стали // Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф. 25—26 декабря 2014 г. "Современные материалы, техника и технологии"; Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО "Университетская книга", Курск, 2014. С. 172—175.
- 13. Изменение диффузии углерода в стали в состоянии полиморфного превращения / Б.В. Фокин, Ю.А. Кустов, А.А. Жуков, А.П. Навоев // Наука, образование, общество: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. 31 марта 2018 г. Ч. 1. Тамбов: ООО "Консалтинговая компания Юком", 2018. С. 115—119.

Анатолий Алексеевич Жуков, канд. техн. наук, anat.juckov2013@yandex.ru; Андрей Павлович Навоев

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 07.02.2019. Подписано в печать 28.03.2019. 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.



# Поздравляем



### Анатолия Алексеевича Жукова, канд. техн. наук, профессора

## с 80-летием!

1 апреля 2019 г. исполнилось 80 лет Анатолию Алексеевичу Жукову, кандидату технических наук, профессору кафедры "Материаловедение, литье, сварка" Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва.

А.А. Жуков после окончания Рыбинского авиационного техникума по специальности "Технология цветного литья" с 1957 по 1963 г. работал в литейном цехе Рыбинского моторостроительного завода технологом и конструктором литейной оснастки. В этот же период Анатолий Алексеевич обучался в Рыбинском вечернем авиационном институте по специальности "Машины и технология литейного производства". С сентября 1963 г. А.А. Жуков работает в РГАТУ им. П.А. Соловьёва, занимая должности ассистента, старшего преподавателя, доцента, профессора, в 1974 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности "Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов".

С 1976 по 1980 г. А.А. Жуков — декан Авиаметаллургического факультета. На протяжении длительного времени (с 1990 по 2008 г.) Анатолий Алексеевич работал заведующим кафедрой "Материаловедение, литье, сварка" (МЛС). В тех сложных финансовых и социально-экономических условиях кафедре удалось сохранить профессорскопреподавательский состав, материально-техническую базу, была открыта подготовка по двум новым специальностям "Материаловедение и технология новых материалов" и "Металлургия сварочного производства".

Учебно-методическая деятельность А.А. Жукова в основном направлена на чтение дисциплин по методам исследований, контролю и управлению качеством материалов и заготовок. По инициативе и при непосредственном участии Анатолия Алексеевича на кафедре МЛС организована учебно-исследовательская лаборатория "Контроль качества материалов и заготовок", оснащенная современными средствами неразрушающего контроля.

Тематика научных исследований А.А. Жукова — повышение качества и обеспечение эксплуатационной надежности материалов и изделий в условиях температурно-силовых воздействий на основе использования физических методов неразрушающего контроля и статистического анализа. Большинство результатов научных исследований внедрены в производство и в учебный процесс.

За 55 лет непрерывной работы в сфере высшего профессионального образования Анатолий Алексеевич подготовил более 150 инженеров и магистров по специальностям и направлениям: литейное производство черных и цветных металлов; материаловедение и технологии новых материалов; металлургия сварочного производства. Под его руководством выполнено и защищено 9 кандидатских диссертаций, а по 12 кандидатским диссертациям А.А. Жуков был официальным оппонентом. По результатам научных исследований и учебно-методической работы Анатолий Алексеевич подготовил и опубликовал (с учетом публикаций в соавторстве) более 300 научных статей и тезисов докладов, 7 монографий, 16 учебно-методических пособий, он также является обладателем 12 авторских свидетельств и патентов и 5 свидетельств о государственной регистрации программного обеспечения в отраслевом фонде алгоритмов и программ.

Анатолий Алексеевич является членом редакционного совета журнала "Справочник. Инженерный журнал", членом-корреспондентом Российской академии проблем качества, членом Российского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, а также председателем Ярославского регионального отделения Российской ассоциации литейщиков.

За добросовестный труд, инициативу и успешную работу по совершенствованию учебного процесса, а также за результативную научно-исследовательскую деятельность и значительный вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов А.А. Жуков дважды (1974 и 1976 гг.) награжден знаком "Победитель социалистического соревнования". В 1980 г. награжден знаком МВССО СССР "За отличные успехи в работе", в 1987 г. — медалью "Ветеран труда", в 1999 г. — знаком Министерства образования Российской Федерации "Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации", в 2010 г. — Почетным знаком губернатора Ярославской области "За заслуги в науке".

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



## 70 лет

### Владимиру Денисовичу Кухарю,

доктору технических наук, профессору Тульского государственного университета

Владимир Денисович родился 16 апреля 1949 г. После окончания средней школы в 1966 г. В.Д. Кухарь поступил в Тульский политехнический институт на специальность "Производство летательных аппаратов". Еще будучи студентом, он вел научно-исследовательскую работу под руководством профессора С.П. Яковлева. В 1972 г. Владимир Денисович с отличием окончил институт и поступил на работу в отраслевую лабораторию при кафедре "Технология штамповочного производства" ТулПИ. В 1975 г. досрочно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности "Механика деформированного твердого тела".

С 1976 по 1995 г. В.Д. Кухарь работал ассистентом, доцентом и профессором кафедры "Технология штамповочного производства". В 1989 г. им была защищена докторская диссертация по теме "Теория процессов штамповки анизотропных и неоднородных полых цилиндрических заготовок импульсным магнитным полем", в 1992 г. получено ученое звание профессора. С 1995 г. и по настоящее время Владимир Денисович заведует кафедрой "Теоретическая механика", с 2005 по 2018 г. был проректором по научной работе ТулГУ.

Профессор В.Д. Кухарь — ведущий ученый страны в области механики процессов пластического формоизменения и магнитно-импульсной обработки металлов. Он автор 14 монографий, более 350 научных статей и 14 авторских свидетельств на изобретения.

С его активным участием подготовлено 20 кандидатских и 4 докторских диссертации. В.Д. Кухарь являлся членом советов по защите диссертаций в Тульском государственном университете, Липецком и Орловском государственных технических университетах. В настоящее время он член трех диссертационных советов Тульского государственного университета.

Владимир Денисович является членом-корреспондентом Академии Естествознания, академиком Академии проблем качества, действительным членом Инженерной академии РФ, членом секции технологии редакционной коллегии журнала "Кузнечно-штамповочное производство", членом редакционного совета журнала "Заготовительные производства в машиностроении".

В.Д. Кухарь награжден нагрудным знаком "Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации" (2001 г.), нагрудным знаком "Почетный машиностроитель" (2001 г.), почетной грамотой Министерства образования РФ (2000 г.), удостоен почетного звания "Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации" (2005 г.), правительственной наградой Вьетнама — медалью "За вклад в дело образования" (2011 г.) и награжден Орденом Дружбы Российской Федерации (2014 г.).

Владимир Денисович дважды удостоен премии Правительства Российской Федерации в области образования: в 2007 г. за работу "Региональный университетский учебно-педагогический комплекс инновационных образовательных технологий по подготовке специалистов для высокотехнологических производств оборонно-промышленного комплекса" для образовательных учреждений высшего профессионального образования и в 2011 г. за научно-практическую разработку "Научно-учебно-педагогический комплекс по подготовке кадров высшей квалификации в области инновационных и высоких технологий обработки металлов давлением".

В 2009 г. В.Д. Кухарь удостоен премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за разработку и создание новой техники.

Владимир Денисович является лауреатом премии Ленинского комсомола в области науки и техники, дважды лауреатом премии им. С.И. Мосина, лауреатом премии им. Б.С. Стечкина и премии М.Т. Калашникова.

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