УДК 621.7

Н.Н. Сергеев, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

А.Н. Сергеев, д-р пед. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: ansergueev@mail.ru)

С.Н. Кутепов, канд. пед. наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: kutepov.sergei@mail.ru)

А.Е. Гвоздев, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

Е.В. Агеев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ageev_ev@mail.ru)

Д.С. Клементьев, магистр, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: denis.klementev.93@mail.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ «КОРКОВЫМ» СПОСОБОМ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ВСТАВОК ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

В настоящей работе для создания технологии изготовления формообразующих вставок, обладающих повышенной термостойкостью, использовали «корковый» способ с применением газотермического напыления (ГТН). Сущность способа заключается в следующем: на модель, представляющую собой зеркальную копию формообразующей поверхности вставки, наносится плазменным напылением рабочий слой толщиной до 3 мм из износостойких порошковых материалов, а затем конструкционный слой толщиной 10…20 мм из более пластичных и дешевых материалов. Напыленную «корку» обрабатывают со стороны, которой она будет устанавливаться в обойму формы, и отделяют от модели. Рабочая поверхность ФВ после отделения от модели по размерам, форме и шероховатости полностью соответствует требованиям чертежа, т.е. она не подвергается дополнительной обработке.

Исходя из соображений доступности и относительно низкой стоимости для рабочих слоев формообразующих вставок, изготавливаемых «корковым» способом с применением ГТН, наиболее часто используют порошки хромоникелевого самофлюсующегося сплава ПН77Х15С3Р2 или металлоидов марок ПН70Ю30 и ПН85Ю15.

Исследования по выбору оптимального состава смеси порошков ПН70Ю30 и ПН77Х15С3Р2 проводили на специальных образцах из стали 45, представляющих собой пластину с размерами в плане 50×50 мм, по периметру которой установлены буртики выступающие над рабочей поверхностью на высоту 1 мм. Рабочая поверхность хромирована и термообработана для получения гарантированного слоя Cr_2O_3, обеспечивающего адгезионную связь покрытия и подложки на уровне 5 МПа. В процессе экспериментов состав смеси порошков варьировали от 95% ПН70Ю30 + 5% ПН77Х15С3Р2 до 70% ПН70Ю30 + 30% ПН77Х15С3Р2 с шагом 5%. Напыление производили по следующему режиму: сила тока – 500 А; напряжение – 60 В; общий расход порошка – 1,5 кг/ч; температура образца – 650 ℃; толщина покрытия – 0,5 мм. Напыленные образцы помещали в муфельную печь и нагревали до температуры 1300°С, при которой их выдерживали в течение 1 часа. После охлаждения до комнатной температуры вместе с печью покрытия осторожно отделяли от образцов и подвергали испытаниям на проницаемость, для чего их помещали в специальные сосуды, обмазывая по периметру специальной мастикой. Затем покрытия с наружной стороны обмазывались слоем густого мела, а в сосуды наливали керосин. Установлено, что напыленные покрытия из смеси порошков с содержание 20% и более сплава ПН77Х15С3Р2 практически не имеют пор (керосин в течение 24 часов не проник на обмазанную мелом поверхность).

Ключевые слова: *газотермическое напыление; «корковый» способ; формообразующие ставки; порошковые покрытия.*

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83

Ссылка для цитирования: Применение технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3(78). С. 67-83.

***

Введение

В настоящее время многие детали трубопроводной арматуры (в частности латунные гайки запорных вентилей) изготавливаются методом литья под давлением. Данный технологический процесс наряду с высокими показателями производительности и качества готовой продукции характеризуется низкой термостойкостью основных деталей литьевых машин – формообразующих вставок (ФВ).

В этой связи в России и за рубежом ведутся постоянные поиски новых материалов для ФВ характеризующихся высокими показателями термостойкости.

В настоящей работе для создания технологии изготовления ФВ, обладающих повышенной термостойкостью, использовали «корковый» способ с применением газотермического напыления (ГТН). Сущность способа заключается в следующем: на модель, представляющую собой зеркальную копию формообразующей поверхности вставки, наносится плазменным напылением рабочий слой толщиной до 3 мм из износостойких порошковых материалов, а затем конструкционный слой толщиной 10…20 мм из более пластичных и дешевых материалов. Напыленную «корку» обрабатывают со стороны, которой она будет устанавливаться в обойму формы, и отделяют от модели. Рабочая поверхность ФВ после отделения от модели по размерам, форме и шероховатости полностью соответствует требованиям чертежа, т.е. она не подвергается дополнительной обработке.

Однако в промышленности вышеописанный способ применяется при изготовлении формообразующих деталей, используемых для получения путем прессования и литья изделий из резины и пластмасс, т.е. когда ФВ работают при относительно низких удельных давлениях (менее 10 МПа) и температурах (100…300 °С). Поэтому исследование возможности эксплуатации ФВ, изготовленных «корковым» способом с применением ГТН, в условиях воздействия значительных термомеханических нагрузок при литье под давлением цветных и черных металлов имеет большой научный и практический интерес.

Выбор материала и технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов

Анализ технологии изготовления гаек запорных вентилей из латуни ЛС59-1 показал, что каждая ФВ в условиях литья под давлением позволяет получить до 5000 шт. деталей. При этом ФВ испытывают циклическое термосиловое воздействие, когда удельное давление при заполнении формы жидким металлом достигает 25 МПа, а температура рабочей поверхности изменяется в интервале 300…950 °С.

Качество формообразующих деталей: шероховатость рабочих поверхностей, механическая прочность, износостойкость и т.д. – зависит от физико-механических свойств материалов, из которых изготавливают вставки.

Для получения ФВ «корковым» способом с применением ГТН исходные материалы разделяют на две группы: А – материалы для рабочего слоя; Б – материалы для конструкционного слоя.

Материалы группы А должны обладать более высокой термостойкостью по сравнению с материалами группы Б, так

как первые работают в непосредственном контакте с жидким металлом. В свою очередь материалы группы Б должны быть более пластичными, так как с ростом толщины конструкционного слоя, получаемого ГТН, в нем резко увеличивается уровень остаточных напряжений, что может привести к разрушению изделий в процессе эксплуатации.

С целью обеспечения высокой точности исполнения формы и размеров всех элементов рабочей поверхности термостойкого слоя материалы группы А следует наносить на модель путем плазменного напыления порошка с размером частиц 40…100 мкм. При изготовлении конструкционного слоя вставки материалы группы Б следует наносить путем электродуговой металлизации проволоки Ø0,8…2 мм, так как указанный процесс имеет производительность в 4…6 раз большую, чем плазменное напыление. Последнее необходимо для снижения трудоемкости изготовления конструкционного слоя ФВ, толщина которого в 5…10 раз больше, чем у термостойкого.

Состав, физико-механические и служебные свойства материалов, используемых для напыления рабочих и конструкционных слоев формообразующих деталей, приведены в таблицах 1 и 2.

Следует отметить, что рекомендуемые выше материалы апробированы лишь при изготовлении изделий из резины и пластмасс, а оценка возможности их применения для вставок форм литья под давлением деталей из медных сплавов в литературе практически отсутствует. В этой связи при выборе материала рабочего слоя ФВ руководствовались следующими критериями [1]:

1. Твердость материала 37…42 HRC.

2. Предел прочности материала на разрыв $\sigma_В$ = 1000…1600 МПа.

3. Температура эксплуатации материала, используемого в качестве жаростойкого и износостойкого покрытия в окислительной среде $Т_Э \geq 600$ °С.

Таблица 1

Химический состав материалов, используемых при изготовлении формообразующих деталей «корковым» способом с применением ГТН [2]

Марка материала	Химический состав, %					
	C	Si	Cr	B	Fe	Ni
Рабочие слои						
СНГН	0,50…1,20	3,00…5,00	12,00…20,00	2,00…4,75	3,00…5,00	осн.
ПНЭ-1	0,02	0,03	–	–	–	осн.
ПН77Х15С3Р2	0,30…0,60	1,50…3,00	12,00…15,00	1,50…2,50	5,00	осн.
ПН73Х16С3Р3	0,40…0,80	2,50…4,50	12,00…16,00	2,00…3,00	5,00	осн.
ПН70Х17С4Р4	0,60…1,00	3,00…5,00	13,00…17,00	2,5…4,00	5,00	осн.
Сплав C-Si-Cr-Ni	0,70	2,00	15,00	–	4,00	осн.
Конструкционные слои						
ПМС-Н	–	–	–	–	–	–
ПНЖ-4М	–	–	–	–	–	–
Проволока сварочная СВ-08Г2С	0,08	0,80…1,20	–	–	осн.	–
БрОФ-10-1	–	–	–	–	–	–

Таблица 2

Механический свойства материалов, используемых при изготовлении формообразующих деталей «корковым» способом с применением ГТН [2]

Марка материала	Предел прочности, МПа				Твердость, HRC
	при разрыве	при сжатии	при изгибе	на срез	
Рабочие слои					
СНГН	163…228	1820…2340	440…534	–	40…46
ПНЭ-1	86…130	660…920	304…336	129…188	148…464 НВ
ПН77Х15С3Р2	300…600	–	800…1300	–	35…45
ПН73Х16С3Р3	150…250	–	600…1100	–	45…55
ПН70Х17С4Р4	160…300	–	450…900	–	> 55
Сплав C-Si-Cr-Ni	70…100	–	230…330	–	> 11
Конструкционные слои					
ПМС-Н	68…104	400…473	146…158	102…132	100 НВ
ПНЖ-4М	68…98	680…1030	183…199	126…190	24…48
Проволока сварочная СВ-08Г2С	62…76	540…860	151…167	103…171	21…26
БрОФ-10-1	120…160	–	–	–	100…120 НВ

Исходя из соображений доступности и относительно низкой стоимости для рабочих слоев формообразующих вставок, изготавливаемых «корковым» способом с применением ГТН, наиболее часто используют порошки хромоникелевого самофлюсующегося сплава ПН77Х15С3Р2 или металлоидов марок ПН70Ю30 и ПН85Ю15. Механические свойства покрытий, получаемых методом плазменного напыления из указанных порошковых материалов, весьма противоречивы [3]. В связи с этим проводили экспериментальные исследования по определению предела прочности на разрыв плазменных покрытий ПН77Х15С3Р2 и ПН70Ю30 в зависимости от параметров режима напыления: сила тока – 300…500 А; напряжение – 40…60 В; расход порошка – 1,0…1,5 кг/ч; размер напыляемых частиц – 40…100 мкм; дистанция напыления – 120 мм; состав плазмообразующего газа – 90% Ar + 10% NH_3; расход плазмообразующего газа – 3,2…3,3 $нм^3$/ч.

Перед напылением поверхность образцов, выполненных из стали 45, подвергали дробеструйной обработке. Напыление осуществляли в специальной камере, где образцы устанавливались во вращающихся центрах. Температура поверхности образцов перед напылением соответствовала комнатной.

Для достижения заданной цели использовали одну из методик планирования экспериментов – поиск оптимальных условий, когда в качестве математической модели процесса применяли линейную функцию отклика [4]:

$$Y_Э = a_0 + a_1 x_1 + ... a_n x_n,$$

где $Y_Э$ – параметр оптимизации, т.е. предел прочности на разрыв напыленного слоя $\sigma_В$; $x_1 \ldots x_n$ – факторы, т.е. параметры режима напыления. В нашем случае x_1 – сила тока; x_2 – напряжение; x_3 – расход материала, а остальные факторы (марка и фракционный состав порошка, дистанция

напыления, состав и расход плазмообразующего газа) во время экспериментов поддерживались постоянными.

Первая серия экспериментов проводилась с покрытиями из порошка ПН70Ю30. Область изменения режимов напыления и результаты экспериментов приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Полученные результаты показали достоверность различных значений σ_B покрытий в зависимости от режима, так как критерий Стьюдента (4,65) превышает его табличное значение. Коэффициенты уравнения регрессии a_i, определяющие степень влияния различных параметров ГТН на величину σ_B, также проверялись по критерию Стьюдента на уровень значимости. Для чего определяли доверительный интервал, величина которого составила Δa_i = 11,4. Сравнение с Δa_i коэффициентов уравнения позволило указать, что для покрытия из порошка ПН70Ю30 в рассматриваемом диапазоне режимов плазменного напыления значимыми являются коэффициенты a_0, a_1 и a_2, т.е. уравнение регрессии можно представить:

$$Y = 82,48 + 12,88x_1 + 15,95x_2,$$

где $Y = \sigma_B$; $x_1 = 2\dfrac{J - 425}{150}$ и $x_2 = 2\dfrac{U - 50}{20}$

(J – сила тока, А; U – напряжение, В).

Таблица 3

Уровни режимов напыления и интервалы их варьирования для порошка ПН70Ю30

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования
	-1	0	+1	
x_1 – сила тока, А	350	425	500	150
x_2 – напряжение, В	40	50	60	20
x_3 – расход материала, кг/ч	1,00	1,25	1,50	0,50

Таблица 4

Результаты экспериментов и матрица их планирования для порошка ПН70Ю30

№ п/п эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	$Y_Э$, МПа
1	+1	-1	-1	-1	52,05
2	+1	-1	+1	+1	81,11
3	+1	+1	-1	+1	87,17
4	+1	+1	+1	-1	109,71
a_i	82,48	15,95	12,88	0,93	

Таким образом, в зависимости от режима напыления предел прочности покрытия из ПН70Ю30 изменяется в весьма широких пределах от 50 до 110 МПа.

Вторая серия экспериментов проводилась для покрытий из порошка ПН77Х15С3Р2. Область изменения режимов напыления представлена в табл. 5.

Необходимость выбора двух диапазонов варьирования параметров режима напыления обусловлена тем, что в процессе проведения экспериментов был обнаружен экстремальный характер зависимости $\sigma_B = f(J, U, G)$ (табл. 6).

Результаты исследований прочностных свойств покрытий из порошка

ПН77Х15С3Р2 показывают, что оно в зависимости от режима напыления имеет, как и покрытие из металлоидов, невысокий предел прочности на разрыв порядка 75…150 МПа.

Таким образом, напыленные покрытия из сплава ПН77Х15С3Р2 и металлоида ПН70Ю30 по величине предела прочности на разрыв не могут удовлетворить требованиям критерия №2 для материалов формообразующих вставок, используемых в процессе литья под давлением латуней.

Таблица 5

Уровня варьирования режимов напыления и интервалов варьирования для порошка ПН77Х15С3Р2

№ режима	Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования
		-1	0	+1	
1	x_1 – сила тока, А	350	375	400	50
2		300	325	350	
1	x_2 – напряжение, В	40	45	50	10
2		30	35	40	
1	x_3 – расход материала, кг/ч	1,00	1,25	1,50	0,50
2		1,00	1,25	1,50	

Таблица 6

Результаты экспериментов и матрица их планирования для порошка ПН77Х15С3Р2

№ п/п эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	$Y_Э$, МПа
По режиму №1					
1	+1	-1	-1	-1	137,30
2	+1	-1	+1	+1	123,50
3	+1	+1	-1	+1	117,20
4	+1	+1	+1	-1	97,60
a_i	118,90	-15,93	-10,30	2,54	
По режиму №2					
1	+1	-1	-1	-1	75,30
2	+1	-1	+1	+1	105,70
3	+1	+1	-1	+1	119,70
4	+1	+1	+1	-1	150,10
a_i	112,70	19,30	12,10	6,00	

Однако твердость рассматриваемых покрытий H ≥ 35 HRC, а также рабочая температура при эксплуатации под воздействием окислительных сред составляет 600 °С для сплава ПН77Х15С3Р2 и 1300 °С для металлоидов типа ПН70Ю30, т.е. по твердости и термостойкости они полностью соответствуют критериям №1 и №3 для ФВ литья под давлением латуней.

Для оценки возможности эксплуатации вставок с напыленными из ПН70Ю30 и ПН77Х15С3Р2 рабочими слоями в условиях литья под давлением латунных гаек были изготовлены формообразующие детали по технологии, состоящей из следующих операций:

1. Контрольная – направлена на определение величины шероховатости и соответствия геометрических размеров модели и рабочей поверхности вставки. Следует отметить, что размеры модели должны соответствовать условию

$$L_B(1+\alpha_B T_M) = L_M(1+\alpha_M T_M),$$

где L_B и L_M – размеры рабочей полости вставки и модели соответственно; α_M и α_B – коэффициенты температурного расширения материалов модели и вставки соответственно; T_M – температура поверхности модели при напылении.

Необходимо, чтобы также выполнялось условие $\alpha_M \geq 1{,}02\alpha_B$, а материал модели обеспечивал при напылении материала рабочего слоя прочность сцепления на уровне 4,5…5,0 МПа. В рассматриваемом случае целесообразно изготавливать модель из стали 12Х18Н10Т, которая при температуре 50°С имеет $\alpha_M = 16\times10^{-6}$ град$^{-1}$, а при рекомендуемой температуре поверхности модели перед напылением 650 °С – $\alpha_M = 18\times10^{-6}$ град$^{-1}$. Величины коэффициентов термического расширения покрытий из ПН70Ю30 и ПН77Х15С3Р2 приведены в табл. 7. Эти данные получены на основе изучения закономерностей изменения длины специальных образцов трубчатой формы, полученных плазменным напылением, в зависимости от температуры нагрева по методике, описанной в работе [5]. Шероховатость поверхности модели контролировали профилографом и характеризовалась она значением параметра R_Z = 20 мкм. Кроме того, следили, чтобы на поверхности модели не было вмятин и задиров.

2. Термообработка модели. Перед напылением рабочих слоев модель подвергали термообработке при температуре 650 °С в течение 30 мин для образования на поверхности гарантированного слоя окисла Cr_2O_3, который и обеспечивает гарантированную прочность сцепления материалов модели и рабочего слоя при напылении на уровне 5 МПа.

Таблица 7

Коэффициенты термического расширения плазменных покрытий из ПН77Х15С3Р2 и ПН70Ю30

Материал / Параметры	ПН77Х15С3Р2		ПН70Ю30	
Температура, °С	50	650	50	650
Коэффициент термического расширения, град$^{-1}$	6,20	14,00	5,00	8,50

3. Напыление «корки» – напыление рабочих слоев (толщиной 2 мм) производили на поверхность модели, нагретой до 650 °С, порошками вышеуказанных марок на режимах, обеспечивающих максимальное значение предела прочности на разрыв напыляемого слоя (см. табл. 3-6). В процессе напыления модель вращалась со скоростью 10 об/мин на специальном столе защитной камеры. При этом угол оси плазмотрона к напыляемой поверхности варьировался в пределах 50…90°. Для предотвращения отслоений «корки» от поверхности подмодельной плиты, и разрушения рабочего слоя, напыление порошка производили как на рабочую, так и на боковую поверхность подмодельной плиты, имеющей радиус R = 20 мм (рис. 1). Затем наносили конструкционный слой толщиной 15 мм способом

дуговой металлизации проволоки СВ-08Г2С по режиму: сила тока – 80 А; напряжение дуги – 30 В; дистанция напыления – 120 мм; температура модели – 400…650 °С; давление воздуха – 0,6 МПа; расход воздуха – 5…6 $м^3$/ч. При напылении рабочего и конструкционного слоев нельзя допускать перегрева «корки» выше допустимого значения фиксируемого по цвету побежалости, в частности синего цвета, так как при этом происходит охрупчивание материала «корки» и увеличивается вероятность ее разрушения.

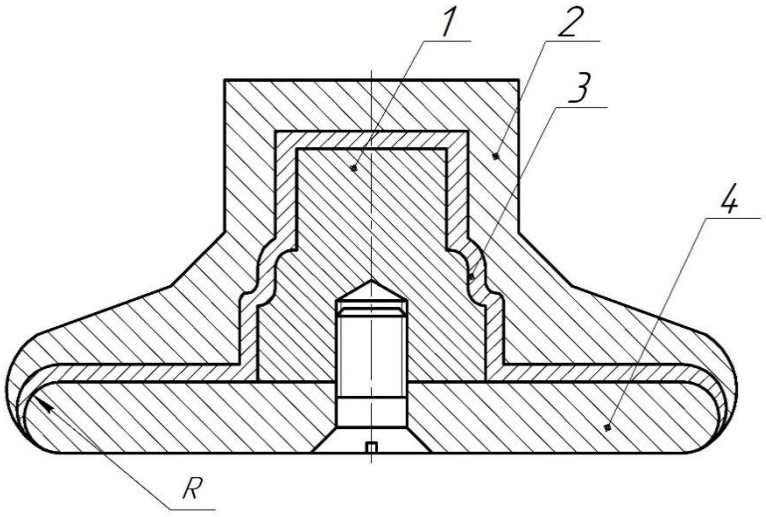

Рис. 1. Схема расположения слоев при напылении «корок» на модель: 1 – модель; 2 – конструкционный слой; 3 – рабочий слой; 4 – подмодельная плита

4. Термообработка «корки». После напыления для снятия внутренних напряжений «корку» вместе с моделью подвергали отпуску в муфельной электропечи при температуре 670 °С в течение 1,5 часов, а затем ее охлаждали до комнатной температуры совместно с печью.

5. Механическая обработка «корки». Термообработанную «корку» подвергали обработке на токарном, фрезерном и шлифовальном станках с целью придания ей со стороны конструкционного слоя геометрической формы и размеров, необходимых для установки ФВ в обойму формы литья под давлением латунных гаек запорных вентилей. Токарная обработка конструкционного слоя производилась на режиме: глубина резания – 0,5 мм; подача – 0,08 мм/об; частота вращения шпинделя – 700…800 об/мин; резец с твердосплавной пластиной марки ВК6. Фрезерование выполняли со скоростью 25 м/мин при глубине резания не более 1 мм. Шлифование осуществляли электрокорундовым кругом с зернистостью 16…20 и твердостью СМ1 при глубине резания 0,06 мм.

6. Отделение «корки» от модели производили на разрывной машине, обеспечивающей одноосное растяжение, неподвижный зажим которой был выполнен с полостью, обеспечивающей подвижное крепление вставки со стороны конструкционного слоя. Разъединение «корки» и модели происходило при нагрузке 28000…32000 Н.

Испытания ФВ, выполненных по вышеописанной технологии с рабочими слоями из ПН77Х15С3Р2 и ПН70Ю30, в условиях литья под давлением гаек из ла-

туни ЛС59-1 показали, что такие вставки позволяют изготовить лишь 80…100 гаек вместо 5000 шт. по норме. Полученные результаты являются следствием того, что напыленный слой имеет высокую пористость, которая в зависимости от условий напыления может достигать 5…10% и более. Как показали исследования, жидкий металл проникает в поры и способствует их раскрытию, т.е. образованию трещин, приводящих к быстрому разрушению поверхностного слоя ФВ, особенно в местах впрыскивания штампуемого металла.

Таким образом материалы ПН77Х15С3Р2 и ПН70Ю30 в напыленном состоянии для рабочих слоев ФВ литья под давлением медных сплавов использовать нецелесообразно. Однако известно, что в литом состоянии самофлюсующиеся хромоникелевые сплавы и металлоиды имеют предел прочности на разрыв $\sigma_B \geq 1000$ МПа при твердости 35…45 HRC [1, 4]. Поэтому встает новая задача – изыскать способ получения монолитных рабочих слоев ФВ, изготавливаемых «корковым» способом с применением ГТН.

Решение поставленной задачи сводится к разработке надежного процесса оплавления напыленного на поверхность модели слоя. Наиболее просто указанный процесс реализуется для плазменных покрытий из относительно легкоплавких хромоникелевых сплавов типа ПН77Х15С3Р2 (их температура плавления составляет 1050…1150 °С), когда оплавление производится за счет тепла ацетилено-кислородного пламени сварочной горелки. Однако в рассматриваемом случае из-за отсутствия надежного метода контроля наблюдается значительная неравномерность глубины оплавления напыленного слоя, что приводит к разрушению рабочего слоя в неоплавленных участках под воздействием жидкого медного сплава в процессе эксплуатации вставки. Кроме того, имеет место резкое снижение прочности адгезионной связи рабочего слоя с конструкционным, что проявляется в образовании трещин между слоями при отделении «корки» от модели.

Положительные результаты были получены при изготовлении формообразующих вставок «корковым» способом с применением ГТН и литья. Оплавление напыленного рабочего слоя здесь осуществляется за счет тепла жидкого серого чугуна, заливаемого в специально изготовленную из формовочной литейной смеси емкость, на дне которой размещена модель. При этом после кристаллизации чугун служит материалом для конструкционного слоя вставки. Исследования выполняли для рабочего слоя толщиной 2 мм, полученного плазменным напылением порошка ПН77Х15С3Р2 на режимах, обеспечивающих наибольшую величину предела прочности на разрыв (см. табл. 5 и 6). Модель выполнена из стали 12Х18Н10Т, прошедшей перед напылением термообработку для получения на поверхности модели гарантированного слоя Cr_2O_3. Модель устанавливалась на металлическую плиту толщиной 20 мм с размерами в плане 750×750 мм, на которую монтировали опоку с предварительно отформованной сквозной полостью диаметром 100 мм и высотой 150 мм (рис. 2). Чугун, выплавленный в индукционной электропечи, ковшом заливали в форму при температуре 1300…1320 °С до отметки 100 мм. После затвердевания чугуна модель извлекали из формы и отделяли от отливки, которую разрезали для приготовления шлифов. В процессе экс-

периментов изучали влияние температуры модели перед заливкой чугуна на глубину оплавления рабочего слоя. Ее оценивали по шлифам на инструментальном микроскопе ИМИ-2. Результаты исследований представлены в табл. 8.

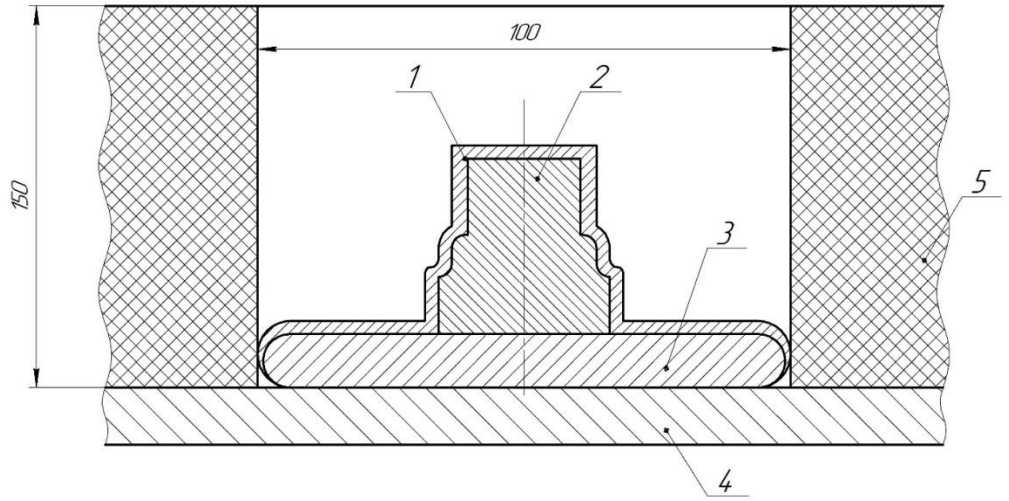

Рис. 2. Схема размещения модели с рабочим слоем вставки в емкости перед заливкой чугуном:
1 – рабочий слой; 2 – модель; 3 – подмодельная плита; 4 – установочная плита;
5 – литейная форма

Следует отметить, что рабочий слой при указанных геометрических параметрах отливки и теплофизических условиях заливки чугуна оплавляется на всю толщину при температуре модели 640…670 °С. Микрорентгеноспектральный анализ показывает уменьшение содержания хрома до 4%, кремния до 1% и никеля до 44% в рабочем слое, что связано с перемешиванием чугуна с материалом рабочего слоя. При этом наблюдается недостаточно качественное копирование формы модели поверхностью рабочего слоя, особенно, в местах, где участки поверхности модели сопрягаются по радиусам $R < 1$ мм. Последнее объясняется относительно невысоким уровнем смачиваемости окисленной поверхности модели жидким металлом, поэтому усилия, развивающиеся в результате усадки затвердевающего расплава, способны отделить рабочий слой от модели.

С целью устранения вышеуказанных недостатков был разработан следующий вариант изготовления рабочих слоев ФВ, оплавляемых после напыления теплом жидкого чугуна: рабочий слой должен состоять из двух подслоев – первый, прилегающий к поверхности модели, напылять смесью порошков ПН70Ю30 и ПН77Х15С3Р2; второй напылять порошком ПН77Х15С3Р2.

Таблица 8

Характеристика оплавления рабочего слоя напыленного из сплава ПН77Х15С3Р2 при заливке жидким чугуном

Температура модели ($T_М$), °С	до 300	350…500	550…650	650…700	750…800
Глубина оплавления рабочего слоя, мм	до 0,25	0,30…1,20	1,50…2,00	2,00	2,00

Такой вариант решения задачи обусловлен тем, что металлоид ПН70Ю30 имеет температуру плавления 1600 °С, т.е. при воздействии тепла жидкого чугуна он расплавляться не должен, поэтому первый подслой будет хорошо копировать форму поверхности модели, так как имеет достаточную прочность адгезионной связи с материалом модели. С другой стороны, металлоид хорошо смачивается жидкими сплавами на никелевой основе, частично растворяясь в них, т.е. добавляя к металлоиду более легкоплавкий хромоникелевый сплав ПН77Х15С3Р2 можно после расплавления последнего получить квазимонолитный, практически беспористый, первый подслой. Для обеспечения прочной адгезионной связи первого подслоя с чугунным конструкционным слоем вставки между ними необходимо создать переходный (второй) подслой из материала, хорошо взаимодействующего в жидком состоянии и с чугуном, и с материалом первого подслоя. Таковым, как показано исследованиями по оплавлению рабочих слоев, является ПН77Х15С3Р2.

Исследования по выбору оптимального состава смеси порошков ПН70Ю30 и ПН77Х15С3Р2 проводили на специальных образцах из стали 45, представляющих собой пластину с размерами в плане 50×50 мм, по периметру которой установлены буртики, выступающие над рабочей поверхностью на высоту 1 мм. Рабочая поверхность хромирована и термообработана для получения гарантированного слоя Cr_2O_3, обеспечивающего адгезионную связь покрытия и подложки на уровне 5 МПа. В процессе экспериментов состав смеси порошков варьировали от 95% ПН70Ю30 + 5% ПН77Х15С3Р2 до 70% ПН70Ю30 + 30% ПН77Х15С3Р2 с шагом 5%. Напыление производили по следующему режиму: сила тока – 500 А; напряжение – 60 В; общий расход порошка – 1,5 кг/ч; температура образца – 650 °С; толщина покрытия – 0,5 мм. Напыленные образцы помещали в муфельную печь и нагревали до температуры 1300 °С, при которой их выдерживали в течение 1 часа. После охлаждения до комнатной температуры вместе с печью покрытия осторожно отделяли от образцов и подвергали испытаниям на проницаемость, для чего их помещали в специальные сосуды, обмазывая по периметру специальной мастикой. Затем покрытия с наружной стороны обмазывались слоем густого мела, а в сосуды наливали керосин. Установлено, что напыленные покрытия из смеси порошков с содержанием 20% и более сплава ПН77Х15С3Р2 практически не имеют пор (керосин в течение 24 часов не проник на обмазанную мелом поверхность).

Заключение

На основании вышеизложенных результатов исследований были изготовлены формообразующие вставки для литья под давлением латунных гаек запорных вентилей по технологии, содержащей следующие операции:

1. Контрольная, обеспечивающая соблюдение определенного качества модели под напыление.

2. Термообработка модели для получения гарантированного слоя окисла Cr_2O_3 на поверхности модели, для обеспечения прочности адгезионной связи материалов модели и рабочего слоя на уровне 5 МПа при напылении.

3. Напыление рабочего слоя (состоящего из двух подслоев) на поверхность модели:

– напыление первого подслоя толщиной 0,5 мм из смеси порошков 80% ПН70Ю30 + 20% ПН77Х15С3Р2 (режим напыления см. уровень «+1» табл. 3);

– напыление второго подслоя толщиной 1,5 мм из порошка ПН77Х15С3Р2 (режим напыления см. уровень «–1» табл. 5).

4. Литье конструкционного слоя из чугуна с одновременным оплавлением рабочего слоя (модель при температуре 650 °С заливается чугуном, имеющим температуру 1300 °С).

5. Термообработка литой модели после ее извлечения из литейной формы – высокий отпуск при температуре 650 °С с охлаждением со скоростью 30 °С/час.

6. Механическая обработка, включающая отделение «корки» от модели и обработку конструкционного слоя, для придания ему формы и размеров, необходимых для установки вставки в обойму формы литья под давлением.

Предварительные лабораторные испытания термостойкости ФВ проводили путем изучения состояния рабочей поверхности после заливки в ФВ расплава латуни ЛС-59-1 при температуре 960 °С. После кристаллизации и остывания латунной отливки до 250 °С ее извлекали из формы и осматривали рабочую поверхность ФВ на наличие образования дефектов. После получения 500 шт. отливок рабочая поверхность вставок не претерпела изменений.

Однако в данных исследованиях поверхность вставки испытывала воздействие расплава только при атмосферном давлении. Поэтому в настоящее время для оценки стойкости ФВ, изготавливаемых по предложенной технологии, необходимо проведение испытаний в промышленных условиях на машинах литья под давлением.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [6-31].

Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Артингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка. М.: Металлургия, 1982. 312 с.

2. Дмитриевич А.М., Логинов И.З., Мурог А.А. Свойства напыленных материалов // Литейное производство. 1974. № 10. С. 6-8.

3. Физико-механические и эксплуатационные свойства защитных покрытий / В.К. Зеленко, Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, В.М. Власов. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 1999. 213 с.

4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 282 с.

5. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.

6. Гвоздев А.Е. , Журавлев Г.М. , Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением / // Технология металлов. 2015. № 11. С. 17-29.

7. Зависимость показателей сверхпластичности труднодеформируемых сталей Р6М5 и 10Р6М5-МП от схемы напряженного состояния / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.Н. Боголюбова // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 11. С. 42-46.

8. Условия проявления нестабильности цементита при термоциклировании углеродистых сталей / А.Е. Гвоздев,

А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, М.Е. Пруцков // Материаловедение. 2014. № 10. С. 31-36.

9. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 114 с.

10. Гвоздев А.Е. Ресурсосберегающая технология термомеханической обработки быстрорежущей вольфрамомолибденовой стали Р6М5 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. №12 (606). С. 27-30.

11. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / Э.С. Макаров, А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев; под. ред. проф. А.Е. Гвоздева. 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 337 с.

12. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

13. Сопряженные поля в упругих, пластических, сыпучих средах и металлических труднодеформируемых системах: монография / Э.С. Макаров, В.Э. Ульченкова, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 526 с.

14. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 32-47.

15. Анализ теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания металлов и сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 3(72). С. 6-33.

16. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

17. Влияние режимов термической обработки на стойкость высокопрочной арматурной стали к водородному растрескиванию / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 4 (25). С. 6-20.

18. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92.

19. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95.

20. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. № 1. P. 148-152.

21. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев,

А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь. 2017. № 6. С. 26-39.

22. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. № 1. P. 126-129.

23. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. № 1. P. 32-36.

24. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS_2 nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. № 1. P. 56-59.

25. Maximum plastic strengthening in tool steels / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, A.E. Cheglov, N.N. Sergeev, O.M. Gubanov // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. № 6. P. 399-411.

26. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

27. Новые конструкционные материалы: учебное пособие / Н.Е. Стариков, В.К. Зеленко, О.В. Кузовлева, А.Н. Сергеев, В.Ю. Кузовлев, А.А. Калинин, А.В. Маляров; под. общ. ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 296 с.

28. Материаловедение: учебник для вузов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев., В.К. Зеленко, А.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е доп. и испр. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 469 с.

29. Технология металлов и сплавов: учебник / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, О.В. Кузовлева, Г.М. Журавлёв, Д.А. Провоторов; под ред. проф. Н.Н. Сергеева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 490 с.

30. Пат. на полезную модель 2016142134 (170385) Образец для определения адгезионной прочности покрытий / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, И.В. Тихонова, А.Д. Бреки, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, А.А. Калинин, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.И. Кузнецова, А.В. Казакова, Д.Н. Романенко, Е.Ф. Романенко, В.Э. Лисицина; заявитель и патентообладатель Гвоздев Александр Евгеньевич. № 2016142134 (17385) заявл. 26.10.16; опубл. 24.04.17, Бюл. № 12. 6 с.

31. Свидетельство РФ №2017616180 о государственной регистрации программы на ЭВМ «Программный комплекс для моделирования ресурсосберегающих производств обработки и фрикционного взаимодействия металлических систем» / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, Ю.С. Дорохин, Д.С. Клементьев, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, П.Н. Медведев, И.В. Минаев, Д.В. Провоторов, Н.Е. Проскуряков, А.Н. Сергеев, Д.М. Хонелидзе. Заявка № 2017613672. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ в Роспатенте 02.06.2017.

Поступила в редакцию 03.05.18

UDC 621.7

N.N. Sergeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

A.N. Sergeev, Doctor of Pedagogic Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: (ansergueev@mail.ru)

S.N. Kutepov, Candidate of Pedagogic Science, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: kutepov.sergei@mail.ru)

A.E. Gvozdev, Doctor of Engineering Science, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

E.V. Ageev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: ageev_ev@mail.ru)

D.S. Klement'yev, Undergraduate, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: denis.klementev.93@mail.ru)

APPLICATION OF TECHNOLOGY IN THE PRODUCTION OF «CORTICAL» METHOD OF FORMING INSERTS FOR DIE CASTING COPPER ALLOYS

In the present work for the creation of manufacturing technology forming statok higher heat resistance used the "cortical" method with the use of thermal spraying (TS). The essence of the method is as follows: on the model, which is a mirror copy of the forming surface of the insert, a working layer up to 3 mm thick of wear-resistant powder materials is applied by plasma spraying, and then a structural layer 10...20 mm thick of more plastic and cheap materials. The dusty "crust" process from which it will be established in a form holder, and separate from model. Working surface FV after separation from the model in size, shape and roughness fully complies with the requirements of the drawing, ie it is not subjected to additional processing.

For reasons of availability and relatively low cost for the working layers forming inserts made of "cortical" method with the use of GTN, the most often used powders camofluage chromium-Nickel alloy ПН77Х15С3Р2 or metalloids brands ПН70Ю30 and ПН85Ю15.

Research into the optimal composition of the mixture of powders ПН70Ю30 and ПН77Х15С3Р2 conducted on special samples of steel 45, which is a plate with dimensions 50□50 mm around the perimeter with ribs protruding above the work surface to a height of 1 mm. working surface is chrome-plated and termoobrabotki to earn a guaranteed layer of Cr2O3, which provides the adhesive connection of the coating and the substrate at the level of 5 MPa. During the experiments, the composition of the mixture of powders ranged from 95% PN70YU30 + 5% PN77H15S3R2 to 70% PN70YU30 + 30% PN77H15S3R2 in steps of 5%. The coating produced according to the following mode: the current is 500 A, voltage – 60 V; the total consumption of powder – 1.5 kg/h; the sample temperature is 650 ℃; coating thickness – 0.5 mm. Deposited samples were placed in a muffle furnace and heated to a temperature of 1300 C, where they were kept for 1 hour. After cooling to room temperature, together with the furnace, the coatings were carefully separated from the samples and subjected to permeability tests for which they were placed in special containers smearing around the perimeter with special mastic. Then the coatings on the outside were covered with a layer of thick chalk, and kerosene was poured into the vessels. It is established that dusty coatings from a mixture of powders with a content of 20% or more of pn77h15s3r2 alloy practically do not have pores (kerosene within 24 hours did not penetrate the chalk-coated surface).

Key words: *gas-thermal spraying; "cortical" method; form-building rates; powder coatings.*

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83

For citation: Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Klement'yev D.S., Application of Technology in the Production of «Cortical» Method of Forming Inserts for Die Casting Copper Alloys. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 3(78), pp. 67-83 (in Russ.).

***

Reference

1. Artinger I. Instrumentalnye stali i ix termicheskaya obrabotka. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 312 p.

2. Dmitrievich A.M., Loginov I.Z., Murog A.A. Svojstva napylennyx materialov. Litejnoe proizvodstvo, 1974, no. 10, pp. 6-8.

3. Zelenko V.K., Sergeev N.N., Izvolskij V.V., Vlasov V.M. Fiziko-mexanicheskie i ekspluatacionnye svojstva zashhitnyx pokrytij. Tula, 1999, 213 p.

4. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyx uslovij. Moscow, Nauka Publ., 1976, 282 p.

5. Kudinov V.V. Plazmennye pokrytiya. Moscow, Nauka Publ., 1977, 184 p.

6. Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M., Kolmakov A.G. Formirovanie mexanicheskix svojstv uglerodistyx stalej v processax vytyazhki s utoneniem. Texnologiya metallov, 2015, no. 11, pp. 17-29.

7. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Bogolyubova D.N. Zavisimost pokazatelej sverxplastichnosti trudnodeformiruemyx stalej R6M5 i 10R6M5-MP ot sxemy napryazhennogo sostoyaniya. Deformaciya i razrushenie materialov, 2015, no. 11, pp. 42-46.

8. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Malyarov A.V., Sergeev N.N., Tixonova I.V., Pruckov M.E. Usloviya proyavleniya nestabilnosti cementita pri termociklirovanii uglerodistyx stalej. Materialovedenie, 2014, no. 10, pp. 31-36.

9. Zhuravlev G.M. Gvozdev A.E. Plasticheskaya dilatansiya i deformacionnaya povrezhdaemost metallov i splavov. Tula, 2014, 114 p.

10. Gvozdev A.E. Resursosberegayushhaya texnologiya termomexanicheskoj obrabotki bystrorezhushhej volframomolibdenovoj stali R6M5. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 2005, no.12 (606), pp. 27-30.

11. Makarov E.S., Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M. Teoriya plastichnosti dilatiruyushhix sred. Tula, 2015, 337 p.

12. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Kolmakov A.G., Tixonova I.V., Sergeev A.N., Provotorov D.A., Xonelidze D.M., Malij D.V., Golyshev I.V. Raspredelenie temperatur i struktura v zone termicheskogo vliyaniya dlya stalnyx listov posle lazernoj rezki. Materialovedenie, 2016, no. 9, pp. 3-7.

13. Makarov E.S., Ulchenkova V.E., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Sergeev A.N. Sopryazhennye polya v uprugix, plasticheskix, sypuchix sredax i metallicheskix trudnodeformiruemyx sistemax; ed. by Gvozdev A.E. Tula, 2016, 526 p.

14. Sergeev N.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Mexanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov, svyazannye s usileniem dislokacionnoj aktivnosti. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, vol. 21, no. 2(71), pp. 32-47.

15. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Analiz teoreticheskix predstavlenij o mexanizmax vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, vol. 21, no. 3(72), pp. 6-33.

16. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Tixonova I.V., Kutepov S.N., Kuzovleva O.V., Ageev E.V. Perspektivnye stali dlya kozhuxov domennyx agregatov. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii, 2017, vol. 7, no. 2(23), pp. 6-15.

17. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Vliyanie rezhimov termicheskoj obrabotki na stojkost vysokoprochnoj armaturnoj stali k vodorodnomu rastreskivaniyu. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii, 2017, vol. 7, no. 4 (25), pp. 6-20.

18. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sapozhnikov S.V., Kutepov S.N., Ageev E.V. Prinyatie reshenij po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produkcii. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2017, vol. 21, no. 5(74), pp. 78-92.

19. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Diffuziya vodoroda v svarnyx soedineniyax konstrukcionnyx stalej. Izvestija Jugo-

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2017, vol. 21, no. 6(75), pp. 85-95.

20. Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Minayev I.V., Tikhonova I.V., Sergeyev A.N., Khonelidze D.M., Maliy D.V., Golyshev I.V., Kolmakov A.G., Provotorov D.A. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. Inorganic Materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

21. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Cheglov A.E., Sergeev N.N., Gubanov O.M. Variant opredeleniya maksimalnogo plasticheskogo uprochneniya v instrumentalnyx stalyax. Stal, 2017, no. 6, pp. 26-39.

22. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeyev N.N., Khonelidze D.M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. Inorganic Materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1. pp. 126-129.

23. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler. Inorganic Materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 32-36.

24. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A., Kolmakov A.G. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS2 nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics. Inorganic Materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 56-59.

25. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Cheglov A.E., Sergeev N.N., Gubanov O.M. Maximum plastic strengthening in tool steels. Steel in Translation, 2017, vol. 47, no. 6, pp 399-411.

26. Baranov V.P., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev N.N., Chukanov A.N. Mnogourovnevyj podxod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnyx konstrukcionnyx stalej pod dejstviem vodoroda. Materialovedenie, 2017, no. 7. pp. 11-22.

27. Starikov N.E., Zelenko V.K., Kuzovleva O.V., Sergeev A.N., Kuzovlev V.Yu., Kalinin A.A., Malyarov A.V. Novye konstrukcionnye materialy; ed. by Gvozdev A.E. Tula, 2017, 296 p.

28. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Zelenko V.K., Sergeev A.N., Kuzovleva O.V., Starikov N.E., Zolotuxin V.I., Breki A.D. Materialovedenie; ed. by Gvozdev A.E. Tula, 2017. 469 p.

29. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Zolotuxin V.I., Sergeev A.N., Breki A.D., Kuzovleva O.V., Zhuravlyov G.M., Provotorov D.A. Tehnologiya metallov i splavov; ed. by Sergeev N.N. Tula, 2017, 490 p.

30. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Provotorov D.A., Xonelidze D.M., Tixonova I.V., Breki A.D., Minaev I.V., Kuzovleva O.V., Malij D.V., Kalinin A.A., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Kuznecova A.I., Kazakova A.V., Romanenko D.N., Romanenko E.F., Lisicina V.E. Patent na poleznuyu model 2016142134 (170385) Obrazec dlya opredeleniya adgezionnoj prochnosti pokrytij. zayavitel i patentoobladatel Gvozdev Aleksandr Evgenevich. № 2016142134 (17385) zayavl. 26.10.16; opubl. 24.04.17, Byul. no. 12. 6 p.

31. Svidetelstvo RF №2017616180 o gosudarstvennoj registracii programmy na EVM «Programmnyj kompleks dlya modelirovaniya resursosberegayushhix proizvodstv obrabotki i frikcionnogo vzaimodejstviya metallicheskix sistem» / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, Yu.S. Doroxin, D.S. Klementev, S.N. Kutepov, O.V. Kuzovleva, D.V. Malij, P.N. Medvedev, I.V. Minaev, D.V. Provotorov, N.E. Proskuryakov, A.N. Sergeev, D.M. Xonelidze. Zayavka № 2017613672. Data gosudarstvennoj registracii v reestre programm dlya EVM v Rospatente 02.06.2017.