

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ**

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Издается с января 2003 г.

Том 17 № 8 август 2019

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

**Зам. председателя
редакционного совета:**
ДЕМИН 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.
КОРТОЧЕНКО 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.
МОНАСТЫРСКИЙ В.П., д.т.н.
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.
ШАГУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШГУНЬКИН 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
"Прессы 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 производство

Илларионов И.Е., Пестряева Л.Ш., Садетдинов Ш.В., Моисеева О.В. Влияние фосфатборатных соединений на физико-механические свойства фурановой смеси	339
Вальтер А.И., Протопопов А.А., Корбанов В.Д. Исследование теплообмена между стальной отливкой и чугунным кокилем при его заполнении	342
Ерофеев В.А., Страхова Е.А. Оценка вероятности соответствия показателей качества шва заданным допускам при разработке технологии сварки	345

Кузнечно-штамповочное производство

Семёнов И.Е., Иванов А.В. Аналитическое решение процесса закрытой прошивки неосесимметричных деталей методом баланса работ	350
Филиппов Ю.К., Глазунов Д.А. Исследование параметров формообразования при холодной высадке стержневых деталей с прямоугольной в плане головкой	354

Прокатно-волочильное производство

Лисовенко Д.С., Полякова М.А., Столяров А.Ю., Гулин А.Е., Никитенко О.А. Особенности контактного взаимодействия высокоуглеродистой проволоки с волокой при комбинированном волочении с кручением	360
Котов С.А., Музарова С.-В.Р., Ливинцова М.Г. Исследование процессов уплотнения порошков терморасширенного графита при прокатке	366

Материаловедение и новые материалы

Лопатина Ю.А., Задорожний Р.Н., Карпухин С.Д. Исследование формы и морфологии поверхности частиц порошков, полученных методом электроэрозионного диспергирования из отходов меди и сплавов на ее основе	371
---	-----

Информация

Скрипка В.Л., Минязева Л.Х. Особенности измерительных сигналов при фазохронометрической диагностике главного привода прокатного стана	376
Лавриненко В.Ю., Батышев К.А., Семенов К.Г. Международная научно-техническая конференция "Инновационные технологии в литейном производстве" в МГТУ имени Н.Э. Баумана	382

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением; 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии; 05.04.11 – Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.04 – Литейное производство; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы; 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы 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.

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

Chairman Assistants
DEMİN 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.
MONASTYRSKY V.P.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
NURALIEV F.A.
OVCHINNIKOV V.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMEONOV B.I.
TREGUBOV V.I.
FIGUROVSKY D.K.
SHATUL'SKY A.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
ÖHLUND E.
TUTMANN T.

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

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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



CONTENTS

Foundry and Welding Productions

- Illarionov I.E., Pestryeva L.Sh., Sadetdinov Sh.V., Moiseeva O.V. Effect of phosphate borate compounds on physical and mechanical properties of furan sand 339
Val'ter A.I., Protopopov A.A., Korbanov V.D. Study of heat transfer between steel casting and cast iron chill during its filling 342
Erofeev V.A., Strakhova E.A. Evaluation of conformity probability of weld quality indicators to specified tolerances at development of welding technology 345

Forging and Stamping Production

- Semenov I.E., Ivanov A.V. Analytical solution of closed piercing process of non-axisymmetric parts by works balancing method 350
Filippov Yu.K., Glazunov D.A. Study of forming parameters at cold heading of rectangular-head bolts 354

Rolling and Drawing Production

- Lisovenko D.S., Polyakova M.A., Stolyarov A.Yu., Gulin A.E., Nikitenko O.A. Peculiarities of contact interaction between high carbon steel wire and die at combination of torsion drawing 360
Kotov S.A., Muzaferova S.-V.R., Livintsova M.G. Study of compaction processes of thermally expanded graphite powders during rolling 366

Physical Metallurgy and New Materials

- Lopatina Yu.A., Zadorozhny R.N., Karpukhin S.D. Study of shape and morphology of particles surface of powders obtained by electroerosion dispersion method from copper waste and alloys based on it 371

Information

- Skripka V.L., Minyazeva L.Kh. Features of measuring signals at phase chronometric diagnostics of main drive of rolling mill 376
Lavrinenko V.Yu., Batyshev K.A., Semenov K.G. International Scientific and Technical Conference "Innovative technologies in foundry industry" in Bauman Moscow State Technical University 382

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: 05.02.09 – technologies and forming machines; 05.02.10 – welding, related processes and technologies; 05.04.11 – nuclear reactor engineering, machines, units and materials technology of nuclear industry; 05.16.01 – physical metallurgy and heat treatment of metals and alloys; 05.16.04 – foundry; 05.16.05 – plastic metal forming; 05.16.06 – powder metallurgy and composite materials; 05.16.08 – nanotechnologies and in Chemical Abstracts database

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

ЛИТЕЙНОЕ И СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВА



УДК 621.742.44

И.Е. Илларионов¹, Л.Ш. Пестряева², Ш.В. Садетдинов¹, О.В. Моисеева¹

(¹ Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары,

² Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, г. Чебоксары)

Влияние фосфатборатных соединений на физико-механические свойства фурановой смеси

Экспериментально исследовано влияние комплексных фосфатборатных соединений на физико-механические свойства фурановой смеси и качество отливок из магниевых сплавов. Установлено, что фосфатборатные комплексы повышают показатели прочности испытуемых смесей во времени при сжатии, предел прочности при растяжении, увеличивают живучесть, снижают остаточную прочность, работу выбивки и осыпаемость, а также улучшают качество поверхности отливок из магниевых сплавов.

Ключевые слова: фурановая смесь; фосфатборатные соединения; предел прочности при сжатии; предел прочности при растяжении; физико-механические показатели; магниевые сплавы; качество отливок.

The effect of complex phosphate borate compounds on the physical and mechanical properties of furan sand and the quality of castings from magnesium alloys experimentally studied. It is found that phosphate borate complexes increase the compressive strength of the tested sands in time, tensile strength, increase survivability, reduce residual strength, knock-out work and friability, and also improve the surface quality of castings from magnesium alloys.

Keywords: furan sand; phosphate borate compounds; compressive strength; tensile strength; physical and mechanical properties; magnesium alloys; quality of castings.

Одной из основных задач литейного производства является улучшение физико-механических свойств формовочных смесей. Известно, что при литье магниевых сплавов в формовочную смесь добавляют в качестве модификаторов бораты, фосфаты и боратфосфатные комплексы [1–5].

Несмотря на большое количество научно-исследовательских работ по формообразованию, исследования в этой области представляют значительный научно-практический интерес и в настоящее время.

В целях разработки многофункционального модификатора к фурановой смеси изучено влияние фосфатборатных соединений

на физико-механические свойства фурановых холодно-твердеющих смесей и качество отливок из магниевых сплавов.

Для исследования использовали сплав МЛ19 (ГОСТ 2856–79). Плавку проводили в стальных тиглях под флюсом из карналлита. Формы заливали при температуре 760 °C сплавом массой 4...5 кг. Формы изготавливали из песка 2K₂O₃016 (ГОСТ 2138–91) с использованием смолы ФК-5 (ТУ 2223-020-66890320–2012) и отвердителя ОК-3 (ТУ 2494-006-95197502–2007).

В качестве фосфатборатных соединений применяли: фосфаттринатрийпентаборат (ФНТПБ) молекулярной формулы 3Na₂B₅O₈·Na₃PO₄·4H₂O; фосфатнатрийтетра-

борат (ФНТБ) — $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и фосфатнатрийдиметаборат (ФНДМБ) — $2\text{NaBO}_2 \cdot \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Синтез и физико-химические характеристики указанных фосфатборатных комплексов описаны в работах [6–8].

Приготовление смесей осуществляли перемешиванием песка с каждым фосфатборатным соединением в отдельности в течение 2 мин в смесителях периодического действия 018М. Далее в приготовленную смесь добавляли 1,5 % смолы и 0,3 % отвердителя согласно рекомендациям производителя фурановой смеси и вновь перемешивали в течение 3 мин.

Составы приготовленных смесей представлены в табл. 1. Смеси исследуемых составов испытывали на прочность при сжатии образцов во влажном состоянии и кинетику нарастания прочности во времени при выдержке на воздухе, а также на прочность сухих смесей при растяжении согласно [9, 10]. Качество поверхности отливки оценивали на отливках цилиндра диаметром $d = 60$ мм и высотой $h = 130$ мм.

1. Составы разработанных смесей с указанием количества модификатора в % от массы песка и в расчете на безводную соль

Компонент смеси	Номер состава смеси						
	1	2	3	4	5	6	7
Смола	1,5						
Отвердитель	0,3						
ФНТПБ	—	0,5	1,0	—	—	—	—
ФНТБ			—	0,5	1,0		
ФНДМБ					—	0,5	1,0
Песок	Остальное						

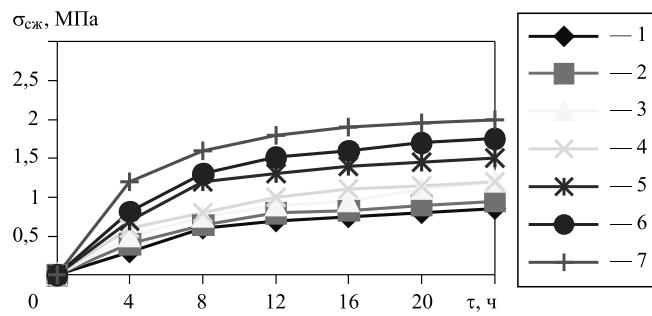


Рис. 1. Влияние времени выдержки на прочность смеси при сжатии:

1–7 — составы смесей № 1–7

Результаты испытаний на прочность и кинетику нарастания прочности во времени при выдержке на воздухе приведены на рис. 1.

Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что прочность испытуемых смесей во времени при сжатии резко возрастает в течение первых 4 ч. Дальнейшее нарастание прочности замедляется и через 24 ч достигается предельная прочность смесей, которая увеличивается в ряду модификаторов: ФНТПБ < ФНТБ < ФНДМБ. При этом более эффективной концентрацией модификаторов является 1 %, чем 0,5 % (см. кривые 2–4 и 5–7 на рис. 1). Достигнутые предельные значения прочности сохраняются в течение 5–6 дней.

На рис. 2 представлены результаты исследований прочности при растяжении образцов через 2 и 24 ч сушки на воздухе после изготовления. В составах № 2, 4 и 6 фосфатборатные соединения концентрации 0,5 % незначительно увеличивают прочность фурановой смеси. Значительное повышение прочности смеси наблюдается при концентрации 1,0 % (составы № 3, 5 и 7). ФНДМБ в большей степени увеличивает прочность фурановой смеси в ряду фосфатборатов ФНТПБ < ФНТБ < ФНДМБ.

Из данных табл. 2 видно, что фосфатборатные соединения улучшают и другие физико-механические показатели. В частности, ФНТПБ, ФНТБ, ФНДМБ способствуют повышению живучести фурановой смеси, улучшают их формуемость, а также снижают осипаемость. Наиболее эффективными являются составы № 3, 5 и 7 в сравнении с составом № 1.

Влияние фосфатборатных соединений на качество отливок из магниевых сплавов оценивали по качеству поверхности отливок и образцов (табл. 3).

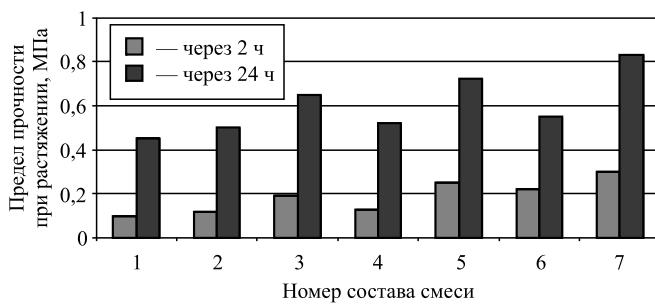


Рис. 2. Изменение прочности сухих фурановых смесей при растяжении образцов в присутствии фосфатборатных соединений

2. Влияние фосфатборатных соединений на физико-механические показатели фурановой смеси

Номер состава смеси	Живучесть, мин	Осыпаемость	Формуемость
			%
1	6	2,2	78,2
2	6	2,1	78,9
3	9	1,8	88,2
4	6	2,0	80,0
5	10	1,4	90,6
6	7	2,0	80,0
7	12	1,0	92,5

3. Влияние фосфатборатных соединений на качество поверхности отливок

Номер состава смеси	Количество отливок с дефектами, %			
	по оксидам		по пригару	
	образцы $d = 60 \text{ мм},$ $h = 130 \text{ мм}$	отливки массой 4...5 кг	образцы $d = 60 \text{ мм},$ $h = 130 \text{ мм}$	отливки массой 4...5 кг
1	4,3	5,7	2,6	4,2
2	4,0	5,3	2,4	3,9
3	2,8	3,3	1,5	3,1
4	3,9	5,1	2,2	3,7
5	2,4	3,0	1,3	2,9
6	3,6	4,8	2,0	3,4
7	1,9	2,4	0,8	2,0

Согласно данным табл. 3 наименьшее количество отливок с дефектами наблюдается при использовании формовочных смесей составов № 3, 5 и 7. Наилучшее качество поверхности отливок получается при использовании состава № 7, что хорошо согласуется с данными, полученными по влиянию составов на физико-механические характеристики.

Заключение. Фосфатборатные соединения улучшают физико-механические свойства фурановой смеси.

Применение фосфатборатных соединений в качестве защитной присадки к фурановой смеси позволяет улучшить качество поверхности отливок из магниевых сплавов.

Разработаны новые, эффективные многофункциональные фосфатборатные модификаторы к фурановой смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Жирков Е.Н.** Бораты натрия, как многофункциональные присадки к фурановой смеси // Литейщик России. 2019. № 3. С. 16–19.
2. **Oxidation of magnesium alloys at elevated temperatures in air: a review / Q. Tan, A. Atrens, N. Mo, M.-X. Zhang** // Corrosion Science. 2016. Vol. 112. P. 734–759.
3. **Влияние борной кислоты на свойства теплоизоляционных смесей / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников, Ш.В. Садетдинов, О.В. Моисеева, А.В. Королев** // Литейное производство. 2019. № 1. С. 24–26.
4. **Дуюнова В.А., Мухина И.Ю., Уридия З.П.** Новые противопригарные присадочные материалы для литейных форм магниевых отливок // Литейное производство. 2009. № 9. С. 15–18.
5. **Каблов Е.Н., Мухина И.Ю., Корчагина В.А.** Присадочные материалы для формовочных смесей при литье магниевых сплавов // Литейное производство. 2007. № 5. С. 15–18.
6. **Влияние фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах / И.Е. Илларионов, Ш.В. Садетдинов, И.А. Стрельников, В.А. Гартфельдер** // Черные металлы. 2018. № 5. С. 47–53.
7. **Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В.** Разработка боратфосфатных связующих смесей на основе фазовых равновесий в водо-солевых системах // Сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. "Современные технологии в машиностроении и литейном производстве". Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. С. 4–7.
8. **Теоретические основы разработки новых ингибиторов коррозии для автотранспортного комплекса / И.В. Фадеев, А.М. Новоселов, Ш.В. Садетдинов** // Вестник МАДИ. 2014. Вып. 4 (39). С. 17–21.
9. **Влияние борной кислоты на физико-механические характеристики теплоизоляционных смесей / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников, Ш.В. Садетдинов, О.В. Моисеева, А.В. Королев** // Литейное производство. 2019. № 4. С. 19–21.
10. **Дуюнова В.А., Гончаренко Н.С., Мухина И.Ю. и др.** Научное наследие академика И.Н. Фридлянда. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ // Цветные металлы. 2013. № 9. С. 71–78.

Илья Егорович Илларионов, д-р техн. наук;
tmilp@rambler.ru;
Людмила Шейисдановна Пестряева, канд. пед. наук;
Шейиздан Вазыхович Садетдинов, д-р хим. наук;
Ольга Валерьевна Моисеева

А.И. Вальтер, А.А. Протопопов, В.Д. Корбанов
(Тульский государственный университет)

Исследование теплообмена между стальной отливкой и чугунным кокилем при его заполнении

Приведены экспериментальные данные по изменению температурного режима пограничного слоя при стальном литье в чугунную металлическую форму. Установлено значительное снижение отвода теплоты между отливкой и формой при применении теплоизолирующего слоя. Это приводит к уменьшению неравномерности в распределении напряжений в поверхностном слое кристаллизующейся отливки и к улучшению ее поверхности.

Ключевые слова: стальная отливка; чугунная форма; теплопередача; поверхностный слой; температура; отвод теплоты; антипригарное покрытие.

Experimental data on change in the temperature regime of the boundary layer during steel casting in cast iron metal mould are presented. Significant decrease in the heat removal between the casting and the mould when using heat-insulating layer is found. This reduces the unevenness in the stresses distribution in the surface layer of the crystallizing casting and improves its surface.

Keywords: steel casting; cast iron mould; heat transfer; surface layer; temperature; heat removal; non-stick coating.

Введение. Условия теплопередачи от отливки к металлической форме (кокиль) играют большую роль в формировании поверхностной зоны отливки и во многом определяют качество поверхности стального литья.

В начальный момент процесса кристаллизации в поверхностном слое металла и прилегающих к нему областях возникают горячие термические напряжения, зависящие от величины и характера температурного градиента. Из-за значительной усадки стального литья, незначительной податливости формы (при наличии обмазки) и высокой интенсивности охлаждения резко возрастает вероятность образования горячих термических трещин. Это и является основным видом брака стального литья в кокиль.

Уменьшить температурный градиент можно созданием теплоизоляционной прослойки между отливкой и кокилем.

Для определения эффективности такой теплоизоляции необходимо установить тепловые потоки от расплава к форме при обычной смазке и при теплоизолирующей прослойке (теплоизоляционный слой).

Методы исследования. Спокойную сталь с содержанием углерода 0,25...0,3 % С, выплавленную в дуговой электропечи, заливали в специальную чугунную форму (материал СЧ25)

вместимостью 10 кг (лабораторные условия). На внутреннюю поверхность первого кокиля наносили теплоизоляционный слой толщиной 1...2 мм (огнеупорная составляющая (циркон, карборунд, оксид хрома), жидкое стекло, борная кислота), на второй кокиль —лак на основе циркониевого порошка.

В стенки формы через специальные вставки монтировали термопары, связанные с измерительно-вычислительным комплексом RATEC на базе персонального компьютера [1].

В результате проведенных экспериментов были получены данные по распределению температур в поверхностном слое отливки и прилегающих к нему областях формы. Температура поверхности покрашенной стенки формы возрастает относительно медленно, в то время как при безводной циркониевой смазке (60 % циркониевого концентрата, 20 % поливинилацетатной эмульсии и 20 % спирта) наблюдается резкий скачок температуры.

Тепловой поток в случае использования теплоизоляционной краски в первые секунды после контакта в 2–2,5 раза меньше, чем при безводной циркониевой смазке. Это приводит к уменьшению скорости кристаллизации поверхностного слоя.

Подсчет скорости кристаллизации по разветвленности дендритов показал, что при

применении теплоизоляции толщина поверхностного слоя отливки на начальных стадиях кристаллизации примерно на 20...30 °C меньше, чем при циркониевом антипригарном покрытии.

В промышленных условиях ОАО "РМЗ" (г. Тула) для проведения исследований использовали форму получения детали "опора для разливочных машин" массой 340 кг из стали 25Л. Измерения температур проводили по разработанной в лабораторных условиях методике. В первом случае при литье форму покрывали антипригарной краской — лаком на основе циркониевого порошка, во втором случае — внутренняя поверхность кокиля была покрыта теплоизолирующим слоем толщиной 1,5 мм. Теплоизолирующий слой наносили пекскодувной головкой.

Изменение температуры внутренней поверхности кокиля в процессе отливки показано на рис. 1.

Как видно из рис. 1, в случае применения теплоизолирующей покраски градиент уменьшения температуры более плавный, что свидетельствует о меньшем отводе теплоты между слитком и формой. Это подтверждает и расчет тепловых потоков от расплава к форме при различных условиях на линии раздела металл—форма.

Характерной особенностью температурных кривых прогрева кокиля является нали-

чие температурных площадок длительностью 2...3 с. Время появления площадок $t = 5\ldots7$ с от момента соприкосновения стали с данной точкой формы. Наличие таких площадок можно связать с образованием микрозазора между металлом и формой из-за деформации поверхностного слоя отливки.

После окончания заливки между рабочей поверхностью кокиля и затвердевающей отливкой по слою огнеупорной облицовки и краски создается большой (700...1000 °C) перепад температур, который с течением времени за счет нагрева поверхности кокиля и охлаждения отливки уменьшается. В начале от расплава через стенки кокиля производится отвод теплоты перегрева и кристаллизации. Далее по мере охлаждения отливки при равномерной усадке между ее стенками и рабочими поверхностями кокиля образуется постепенно увеличивающийся зазор, который заполняется газами, выделяющимися из расплава отливки и продуктов сгорания краски и облицовки. Зазор образуется в результате уменьшения размеров отливки при ее охлаждении и увеличения полости кокиля вследствие расширения его материала при нагреве.

На рис. 2 показаны изменения тепловых потоков (интенсивности теплопередачи) Q во времени.

Максимального значения тепловой поток достигает в течение первых 6...9 с после сопри-

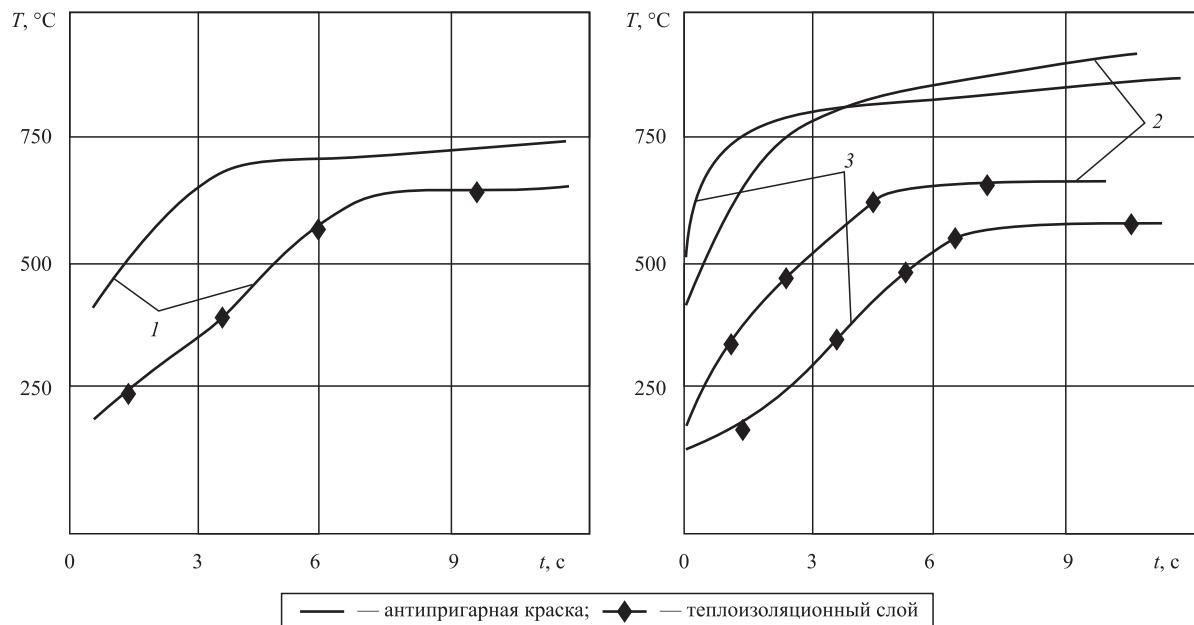


Рис. 1. Изменение температуры на поверхности формы от времени начала контакта расплава с формой:
1 — высота заполнения формы 240 мм; 2 — 380 мм; 3 — 440 мм

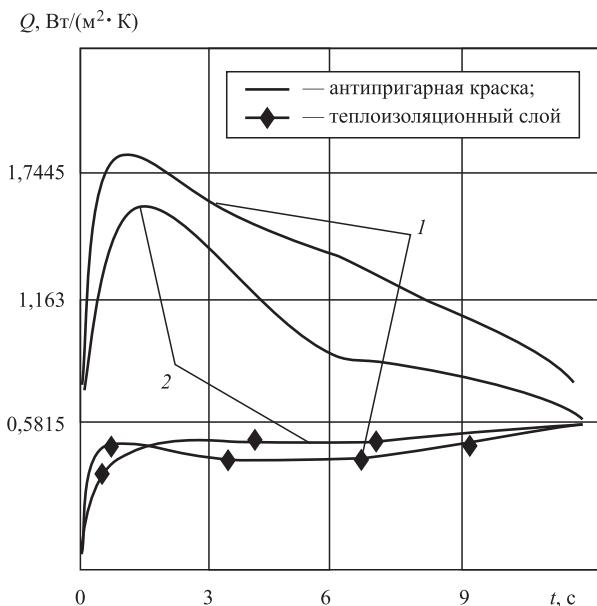


Рис. 2. Изменение тепловых потоков в зависимости от времени:

1 — высота заполнения формы 240 мм; 2 — 380 мм

косновения жидкой стали с соответствующим уровнем изложницы, затем резко падает.

В случае применения теплоизоляционной краски максимальный тепловой поток в 2—2,5 раза ниже, чем при обычной антипригарной краске [2].

Температура наружной поверхности отливки при наличии теплоизоляционного слоя в первую минуту кристаллизации примерно на 100 °C выше, чем при обычной антипригарной покраске.

Согласно расчетам, для стальной отливки, залитой за 5...10 с, в период заполнения формы отводится 105...125 кДж/кг. Для отливки, от-

литой в форму с теплоизоляционным слоем, удельное количество теплоты снижается до 50...60 кДж/кг, или до 5...7 %.

Сетка разгара на рабочей поверхности чугунного кокиля появляется в виде плотно расположенных и различно ориентированных трещин [3]. При небольших термических напряжениях трещины (поверхностные) распространяются по включениям графита на малую глубину, при значительных термических напряжениях возникают более глубокие трещины (трещины II и III рода).

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о значительном снижении тепловых напряжений между отливкой и формой при использовании теплоизолирующего слоя. Это приводит к уменьшению неравномерности в распределении напряжений в корочке кристаллизующегося слитка и к улучшению его поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вальтер А.И., Протопопов А.А. Основы литейного производства. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 331 с.
2. Евдокимов Е.Г., Баранов А.А., Вальтер А.И. Генезис электронной конфигурации в железоуглеродистых сплавах. Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. 192 с.
3. Голод В.М., Денисов В.А. Теория, компьютерный анализ и технология стального литья. СПб.: ИПЦ СПГУТД, 2007. 610 с.

Александр Игоревич Вальтер, д-р техн. наук,
valter.alek@rambler.ru;
Александр Анатольевич Протопопов, д-р техн. наук;
Владимир Дмитриевич Корбанов



В.А. Ерофеев, Е.А. Страхова
 (Тульский государственный университет)

Оценка вероятности соответствия показателей качества шва заданным допускам при разработке технологии сварки

Рассмотрены проблема оценки вероятности соответствия результатов сварки предъявляемым требованиям методами компьютерного инженерного анализа на стадии проектирования технологии, а также методика оценки вероятности получения заданных показателей качества, основанная на виртуальном воспроизведении технологического процесса при возможных отклонениях от нормы множества технологических факторов с последующим вероятностным анализом полученных отклонений показателей качества и их сравнением с допустимыми. Приведен пример оптимизации технологии лазерной сварки, который показал эффективность предложенной методики и возможность минимизации вероятности несоответствия качества шва предъявляемым требованиям посредством выбора оптимальных параметров режима сварки.

Ключевые слова: лазерная сварка; качество сварки; коэффициенты чувствительности.

The problem of the conformity probability evaluation of the welding results to the shown demands by the computer engineering analysis methods at the technology design stage and the technique of the reception probability evaluation the specified quality indicators which is based on the virtual reproduction of the technological process in the event of any deviations from the norm of many technological factors with subsequent probabilistic analysis of the deviations of quality indicators and their comparison with acceptable are considered. There is given example of optimization of laser welding technology which showed the effectiveness of the proposed method and the ability to minimize the nonconformity probability of the weld quality to the shown demands by selecting the optimum welding parameters.

Keywords: laser welding; welding quality; sensitivity coefficients.

Обеспечение качества — важнейшая задача технологии машиностроения. Задачами проектирования технологии является обеспечение качества, высокой производительности и минимальных затрат энергии и материалов.

Традиционно параметры технологии изготовления изделий машиностроения оценивают по технико-экономическим показателям производства и результатам контроля параметров изделия. На начальном этапе создания производства нового изделия технологию изготовления проектируют на основе предшествующего опыта, обобщенного в стандартах, нормалях и технологических инструкциях. После запуска производства из-за неполного соответствия имеющегося опыта реальным условиям производства нового изделия неизбежно появляется значительное количество изделий, качество которых не соответствует требованиям. Этого соответствия добиваются на основе статистического анализа причин низкого качества изделий с последующей корректировкой технологии.

Недостатком сложившейся практики обеспечения качества является большая длительность адаптации технологии. В частности, при производстве сварных конструкций дефекты сварки возникают как следствие случайных отклонений от нормы внешних факторов, так и вследствие внутренней нестабильности процесса при неудачно выбранных параметрах процесса. При проектировании технологии сварки вероятность возникновения дефектов формирования сварного шва, как правило, не оценивается. В лучшем случае, технология сварки проверяется в лаборатории на опытных образцах, что не соответствует реальным условиям производства. Поэтому создание системы прогнозирования качества на стадии проектирования технологии сварки является актуальной задачей.

Создание такой системы возможно только на основе теоретических решений, так как для новых технологий нет опытных данных. Для прогноза вероятности возникновения дефектов необходимо создание физико-математи-

ческих моделей, связывающих все значимые параметры технологического процесса и свойства сплавов с показателями качества.

Предложена методика решения задачи прогнозирования качества, основанная на комбинации физико-математического моделирования физических процессов и статистических методах оценки вероятности получения заданных показателей качества.

Примером оптимизации технологии по показателям качества является процесс формирования соединений при лучевой сварке, для которого разработаны адекватные модели формирования сварного шва [1–7].

Главный критерий качества сварки — прочность соединения, которая непосредственно связана с размерами шва, в первую очередь его поперечного сечения, с расположением шва относительно свариваемого стыка и структурой металла шва и околошовной зоны.

Прочность шва определяется площадью его несущего сечения, расположение которого зависит от способа приложения нагрузки. В большинстве случаев несущее сечение совпадает с поверхностьюстыка между свариваемыми деталями, заполненного переплавленным металлом (рис. 1).

Для протяженных швов площадь несущего сечения определяется длиной стыка, охваченного контуром поперечного сечения шва. Размер несущего сечения зависит от размера и положения шва относительно стыка. При лучевых способах сварки даже небольшие смещения шва от стыка могут вызывать большое изменение прочности соединения.

По условиям сборки сварной конструкции нежелательно формирование швов с большой выпуклостью и с провисанием шва. Формирование швов, поверхность которых имеет форму впадины (мениск) также недопустимо, так как из-за уменьшения несущего размера и появления концентрации напряжений такие швы имеют заметно меньшую прочность.

Задача оценки стабильности сварки сводится к расчету дисперсии S_Y значений показателей Y качества сварки по заданным дисперсиям S_X параметров X сварочного процесса. При допущении, что отклонения малы и независимы и распределены по нормальному закону отклонения показателей качества до-

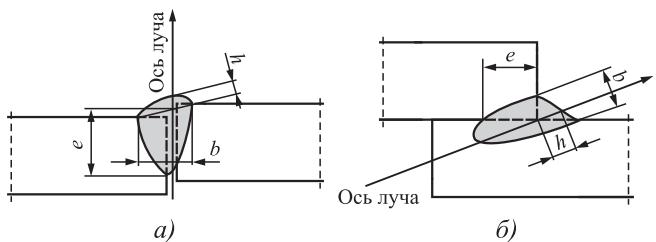


Рис. 1. Геометрические показатели качества формирования стыкового (а) и углового (б) швов:

e — глубина проплавления; h — высота выпуклости шва ($h < 0$ — мениск); b — ширина шва

пустимо считать пропорциональными отклонениям параметров сварочного процесса:

$$S_{Yj} = \sqrt{\sum_{j=1}^n K_{i,j}^2 S_{Xj}^2}, \quad (1)$$

где j — номер показателя качества; i — номер параметра; n — число параметров процесса; $K_{i,j}$ — коэффициент чувствительности показателя качества Y_j к параметру X_i .

Вследствие нелинейности процессов сварки значения коэффициентов чувствительности сильно зависят от значения параметров Z режима сварки. Если параметры области допустимых значений изменяются в широком диапазоне, то коэффициенты чувствительности нужно определять для нескольких наборов значений параметров Z этой области.

Цель — определение значений параметров Z , при которых вероятность получения значений показателей качества внутри поля допусков максимальна. Решение задачи сводится к расчету распределения указанной вероятности внутри области допустимых значений параметров сварки с последующим поиском максимума этой вероятности:

$$p = \prod_{j=1}^m \left[\Phi\left(\frac{Y_{\max,j} - Y_{0,j}}{S_{Yj}(Z)}\right) + \Phi\left(\frac{Y_{0,j} - Y_{\min,j}}{S_{Yj}(Z)}\right) \right] \xrightarrow[Z=\text{var}]{} \max, \quad (2)$$

где m — число учитываемых показателей качества; Φ — функция Лапласа; $Y_{\min,j} \dots Y_{\max,j}$ — диапазон допустимых значений показателей качества Y_j ; $Y_{0,j}$ — номинальные значения показателей качества; $S_{Yj}(Z)$ — зависимости

среднеквадратичных отклонений показателей качества от параметров Z режима сварки.

Зависимости $S_{Yj}(Z)$ можно получить как зависимости коэффициентов чувствительности $K_{Xi}^{Yj}(Z) = \frac{S_{Yj}}{S_{Xi}}$ по результатам вычислительно-

го эксперимента над моделью процесса сварки при разных значениях параметров Z режима, обеспечивающих заданные номинальные значения $Y_{0,j}$ показателей качества.

Методика определения коэффициентов чувствительности при использовании имитационных моделей та же, что и при выполнении опытных сварок. Вначале определяют значения параметров, при которых формируется соединение с удовлетворительными значениями показателей качества. Затем выполняют имитацию, отклоняя значения каждого из параметров на значение $\pm\Delta x \approx S_{Xi}$. При этом возникают отклонения показателей качества от номинального значения $\Delta y \approx S_{Yj}$.

В качестве примера рассмотрим задачу по оценке стабильности лазерной сварки стыкового соединения стальных листов толщиной 4 мм твердотельным лазером с диаметром луча 0,4 мм при скорости сварки 2 м/мин. Стабильность параметров процесса оценена максимальными отклонениями, принятыми равными двум среднеквадратичным значениям $3S_X$ (табл. 1). В табл. 1 приведены также номинальные значения параметров процесса.

Результаты компьютерной имитации приведены на рис. 2.

Влияние отклонений технологических факторов неодинаково при разных режимах. При сварке главными параметрами режима являются мощность и скорость процесса. Оценка влияния режима на коэффициенты чувствительности приведена в табл. 2.

Значения коэффициентов чувствительности для скоростей 1 и 4 м/мин значительно различаются. Если чувствительность размеров шва к нестабильности мощности и скорости меньше при большой скорости сварки, то к зазору и диаметру луча — при малой скорости. Общая нестабильность S_{Yj} каждого размера Y_j шва оценена (1) для указанных среднеквадратичных отклонений S_{Xi} параметров X_i (табл. 3).

Этот анализ показал, что влияние нестабильности технологических параметров S_{Xi} на

1. Номинальные значения и вероятные отклонения параметров процесса лазерной сварки

Параметр X_i	$X_{i,0}$	$3S_{Xi}$	Метод оценки отклонения
Скорость сварки	2 см/с	$\pm 5\%$	По частоте вращения электродвигателя механизма
Мощность лазера	2,7 кВт	$\pm 3,5\%$	Паспортные данные лазера
Диаметр луча в фокусе	0,4 мм	$\pm 0,05$ мм	
Зазор между деталями	0,1 мм	$\pm 0,1$ мм	Допуск на зазор
Взаимное смещение кромок			Допуск по условиям сборки
Смещение луча	0 мм	$\pm 0,5$ мм	Погрешность позиционирования стыка

показатели качества S_{Yj} существенно зависят от режима Z . В данном случае размеры шва более стабильны при малой скорости сварки, причем главной причиной низкой стабильности при сварке на высокой скорости является большой диапазон возможного изменения ширины сборочного зазора.

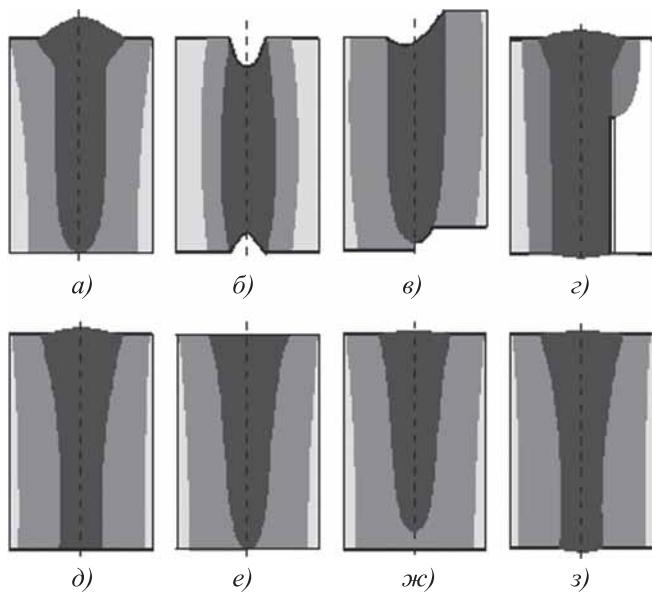


Рис. 2. Результаты имитации лазерной сварки стальных листов толщиной 4 мм твердотельным лазером мощностью 2,7 кВт и диаметром в фокусе 0,4 мм со скоростью 2 м/мин при различных отклонениях:

a, б — с зазором 0 и 0,2 мм; *в* — при смещении кромок 0,5 мм; *г* — при смещении луча 0,5 мм; *д, е* — при скорости сварки 1,8 и 2,2 м/мин; *ж, з* — при мощности 2,5 и 2,9 кВт

2. Коэффициенты $k_{X_i}^e$ чувствительности глубины проплавления e к нестабильности S_{X_i} параметров X_i процесса

Коэффициент $k_{X_i}^e$ чувствительности	Единица	Параметры режима Z	
		1 м/мин; 1,5 кВт	4 м/мин; 2,5 кВт
К мощности	мм/кВт	2,3	1,2
К скорости	мм/(м/мин)	-1	-0,8
К диаметру луча	мм/мм		-5,5
К зазору		2	7,5

Оценим (2) вероятность p получения соединения в рассмотренном случае лазерной сварки для нескольких значений скорости при мощностях, обеспечивающих номинальную глубину проплавления $e_0 = 3,75$ мм. Среднеквадратичное отклонение показателей качества для этих скоростей определим линейной интерполяцией результатов анализа стабильности (табл. 4).

Вероятность одновременного соответствия всех размеров шва заданным допускам (2) при скорости сварки $v_w = 1$ м/мин равна $p_{v=1} = 0,74$; при $v_w = 2$ м/мин — $p_{v=2} = 0,78$; при $v_w = 4$ м/мин — $p_{v=4} = 0,41$. Вероятность получения качественного шва наиболее велика при скорости 2 м/мин (рис. 3).

Однако и при этой скорости значение вероятности недопустимо мало. Значительная доля швов ($\approx 22\%$) будет иметь размеры, не укладывающиеся в допуск, значит, необходимо повысить стабильность технологических факторов, например введением контроля их значений или использованием более точного оборудования.

Как показал данный пример, компьютерный инженерный анализ позволяет определить параметры технологии, обеспечивающие максимальную вероятность получения показателей качества, соответствующих заданным требованиям.

3. Прогноз вероятных отклонений размеров шва S_{Y_j} , вызываемых нестабильностью параметров сварки

Параметр X_i	Отклонение $\pm 3S_{X_i}$	Отклонения размеров шва $3S_{Y_j}$, мм, при различных режимах Z					
		1 м/мин; 1,5 кВт			4 м/мин; 2,5 кВт		
		S_e	S_h	S_b	S_e	S_h	S_b
Мощность луча	0,1 кВт	0,23	0,03	0,03	0,12	0	0,04
Скорость сварки	0,2 м/мин	0,2	0,2	0,22	0,08	0,12	0,04
Диаметр луча	0,05 мм	0,05	0,01	0,08	0,27	0	0,17
Зазор	0,1 мм	0,2	0,11	0,3	0,75	0,44	0,5
Общая нестабильность S_{Y_j}		0,37	0,23	0,38	0,81	0,46	0,53

4. Вероятность p_Y соответствия размеров Y_j шва допускам Y_{\min}, Y_{\max} при различной скорости сварки

Размер шва Y_j	Параметры режима сварки Z	$Y_{0,j}$	$Y_{\min,j}$	$Y_{\max,j}$	$3S_{Y_j}$	p_{Yj}
Глубина проплавления e	1 м/мин; 1,6 кВт	3,75	3,5	4,0	0,37	0,954
	2 м/мин; 2 кВт				0,5	0,866
	4 м/мин; 2,6 кВт				0,81	0,64
Выпуклость шва h	1 м/мин; 1,6 кВт	0,2	0	—	0,23	0,995
	2 м/мин; 2 кВт	0,14			0,31	0,911
	4 м/мин; 2,6 кВт	0,06			0,46	0,655
Ширина ЗТВ b	1 м/мин; 1,6 кВт	3,4	3,5	—	0,38	0,78
	2 м/мин; 2 кВт	2,6			0,42	0,999
	4 м/мин; 2,6 кВт	2			0,53	

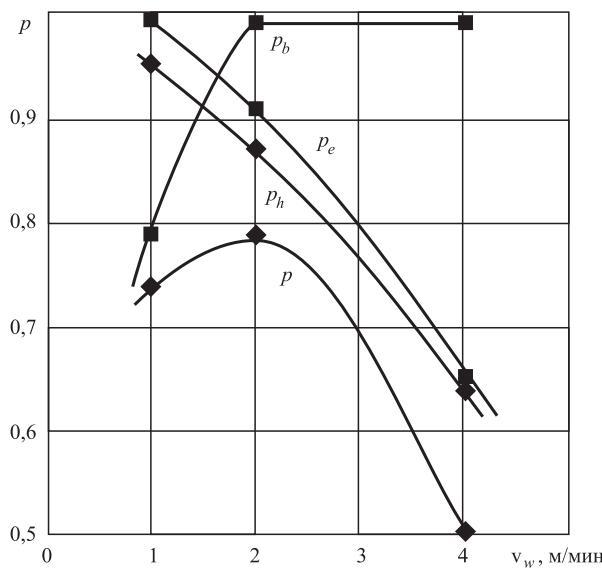


Рис. 3. Зависимость вероятности соответствия шва по глубине проплавления p_e , по высоте выпуклости p_h и по ширине шва p_b и общая вероятность p соответствия шва по указанным показателям

Выводы

1. Проблема оценки вероятности соответствия результатов сварки предъявляемым требованиям может быть решена методами компьютерного инженерного анализа, основанными на физико-математическом моделировании технологического процесса на стадии проектирования технологии.

2. Основой методики оценки вероятности получения заданных показателей качества является виртуальное воспроизведение технологического процесса при возможных отклонениях значений множества технологических факторов с последующим вероятностным анализом полученных отклонений показателей качества и их сравнением с допустимыми.

3. Приведенный пример компьютерного инженерного анализа технологии лазерной

сварки продемонстрировал возможность минимизации вероятности несоответствия качества шва предъявляемым требованиям посредством выбора оптимальных параметров режима сварки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Судник В.А., Ерофеев В.А., Радаи Д. Компьютерное моделирование лазерно-лучевой сварки: концепция и реализация // Сварочное производство. 1996. № 9. С. 34—37.
2. Судник В.А., Ерофеев В.А., Иванов А.В. Создание и внедрение компьютерных технологий прогнозирования формирования шва при дуговой сварке // Сварочное производство. 1997. № 11. С. 40—45.
3. Судник В.А., Радаи Д., Ерофеев В.А. Компьютерное моделирование лазерно-лучевой сварки: моделирование и верификация // Сварочное производство. 1997. № 1. С. 31—36.
4. Судник В.А., Ерофеев В.А., Радаи Д. Компьютерная имитация формирования шва при лазерно-лучевой сварке с зазором // Сварочное производство. 1999. № 8. С. 9—14.
5. Ерофеев В.А. Моделирование особенностей формирования парогазового канала при электронно-лучевой сварке // Сварка и диагностика. 2009. № 4. С. 12—18.
6. Теплофизические процессы в зоне обработки тугоплавких металлов и стали концентрированными потоками энергии / Ю.В. Будкин, Е.Н. Сивов, А.А. Калужный, В.А. Ерофеев // Технология машиностроения. 2014. № 1. С. 31—34.
7. Васильев А.А., Ерофеев В.А., Судник В.А. Возникновение колебаний глубины парогазового канала при лучевых способах сварки // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 130—141.

Владимир Александрович Ерофеев, канд. техн. наук;
Елена Александровна Страхова, канд. техн. наук,
strahova_e@mail.ru



КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО



УДК 621.777

И.Е. Семёнов, А.В. Иванов

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

Аналитическое решение процесса закрытой прошивки неосесимметричных деталей методом баланса работ

Представлены результаты теоретического исследования сил деформирования и контактных давлений при закрытой прошивке неосесимметричных деталей коробчатой формы. Предложенный подход базируется на энергетическом методе, так как в этом случае удается исследовать изменение силы деформирования во времени и учесть любые условия трения заготовки о стенки рабочего инструмента. Полученные аналитические зависимости сил деформирования и контактных давлений учитывают геометрические и кинематические параметры процесса прошивки для любого произвольного момента времени. Проведено сравнение результатов аналитического расчета с экспериментальными данными.

Ключевые слова: закрытая прошивка; энергетический метод; сила деформирования; контактное давление; работа сил деформирования.

The results of theoretical studies of the closed piercing process the box-shaped parts are presented. The proposed approach based on the energy method, since in this case it is possible to investigate the change of the deformation force in time and take into account any conditions of friction of the workpiece against the wall of the working tool. As result, analytical dependencies obtained, allowing determining the deformation forces and the intensity acting on the tool at any stage of the closed piercing process depending on the geometric and kinematic parameters of the process. The results of theoretical study with experimental data are compared.

Keywords: closed piercing; works balancing method; deformation force; intensity; work of deformation.

Введение. Существующие аналитические подходы к оценке сил деформирования при закрытой прошивке неосесимметричных деталей коробчатой формы применимы к определенному классу изделий и не охватывают всего многообразия деталей, которые можно получить закрытой прошивкой [1]. Также эти подходы не позволяют исследовать изменение энергетических параметров процесса во времени. В первую очередь это связано с тем, что решения на основе инженерного подхода получаются для фиксированного этапа формоизменения, как правило, конечного [2].

Известные теоретические исследования процесса закрытой прошивки деталей коробчатой формы с допущением, когда деформация на центральном участке плоская, а на концевых участках имеется радиальное течение металла, не соответствуют действитель-

ности, так как на основании такой модели максимальная высота стенки выдавливаемой коробочки ожидается в углах, что противоречит экспериментальным данным.

Рассмотрим задачу определения сил деформирования энергетическим методом. Данный метод для оценки изменения сил деформирования во времени позволяет рассмотреть любой этап деформирования, а также учесть любые условия трения заготовки о стенки рабочего инструмента, в том числе, если процесс протекает с воздействием активных сил трения [3–5].

Постановка задачи и решение проблемы. Предложенная модель течения металла в матрице под пуансоном при закрытой прошивке неосесимметричных деталей коробчатой формы базируется на принципе наименьшего сопротивления [5, 6]. Такое течение металла

наблюдается, например, при осадке призматического тела между параллельными плитами. На основании этого расчетную схему процесса закрытой прошивки можно представить в виде, показанном на рис. 1, со следующими допущениями:

- материал заготовки является изотропным, однородным и несжимаемым, а его свойства описываются моделью жестко-пластичной среды;
- компоненты перемещений — линейные функции компонентов деформаций, которые не зависят от координат;
- угловые сдвиги в элементарных объемах отсутствуют;
- объем заготовки состоит из участков I, II, III, IV, I', II', III', в которых пластические деформации распределены в участках I, I', II', а жесткими являются участки III, III', IV. Под пуансоном металл течет только вдоль осей x и y ;
- для исключения разрывов функции перемещения на границах участков заготовки введены работы касательных напряжений от перерезывающих сил.

Анализ состояния металла при закрытой прошивке пуансоном с плоским торцом показывает, что процесс можно разбить на три стадии.

На первой стадии процесса происходит заполнение зазора между пуансоном и матрицей выдавливаемым металлом в направлении высоты.

Во время второй стадии пластическая деформация распространяется в металле под

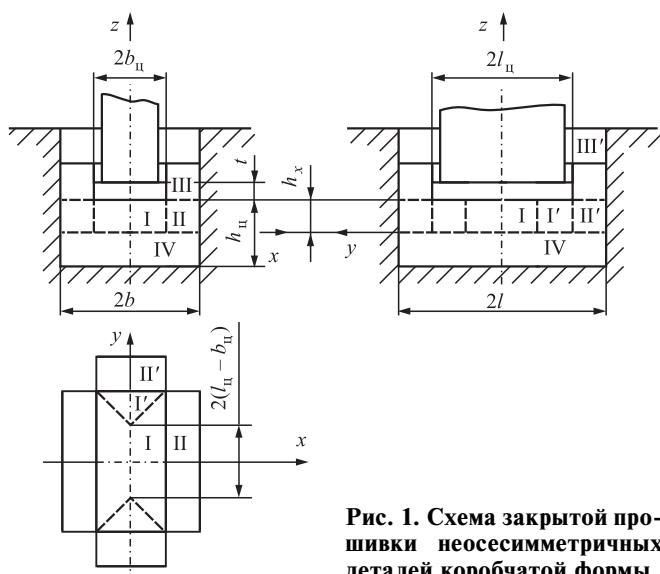


Рис. 1. Схема закрытой прошивки неосесимметричных деталей коробчатой формы

пуансоном на определенную глубину, а выданный из-под пуансона металл течет только в направлении высоты заготовки.

На третьей стадии процесса пластическая деформация распространяется по всему объему металла под пуансоном.

При выводе аналитических зависимостей сил деформирования и глубины проникновения пластической деформации учитывали, что при закрытой прошивке заготовка находится в состоянии плоской деформации.

При энергетическом подходе сила деформирования и контактное давление на торце пуансона определяются из равенства работ, совершаемых внутренними и внешними силами:

$$A_n = A_{\text{тр.г}} + A_{\text{тр.в}} + A_{\text{ср}} + A_{\text{вн}},$$

где A_n — работа деформирующей силы, приложенной к торцу пуансона; $A_{\text{тр.г}}$, $A_{\text{тр.в}}$ — работа касательных напряжений от сил трения, действующих по горизонтальным и вертикальным поверхностям; $A_{\text{ср}}$ — работа касательных напряжений от перерезывающих сил, действующих на границах участков; $A_{\text{вн}}$ — работа внутренних сил.

Компоненты относительных деформаций для малой осадки h на участках I и I':

$$\varepsilon = \varepsilon_{x1} = \varepsilon_{z1} = \frac{\Delta h}{h_x}; u_{x1} = \varepsilon x \text{ при } 0 \leq y \leq l_{\text{u}} - b_{\text{u}};$$

$$u_{x1} = \varepsilon(x - y + l_{\text{u}} - b_{\text{u}})$$

$$\text{при } l_{\text{u}} - b_{\text{u}} \leq y \leq l_{\text{u}}; u_{z1} = \varepsilon z; \gamma_{xz1} = 0;$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{y1'} = \varepsilon_{z1'} = \frac{\Delta h}{h_x}; u_{y1'} = \varepsilon(y - x - l_{\text{u}} + b_{\text{u}});$$

$$u_{z1'} = \varepsilon z; \gamma_{xz1'} = 0;$$

на участках II и II':

$$\varepsilon_{x2} = -\varepsilon_{z2} = -\varepsilon'; u_{x2} = \varepsilon'(b - x);$$

$$u_{z2} = \varepsilon' z; \gamma_{xz2} = 0,$$

$$\text{где } \varepsilon' = \frac{(2l_{\text{u}} - b_{\text{u}})b_{\text{u}}}{2l_{\text{u}}(b - b_{\text{u}})} \varepsilon;$$

$$\varepsilon_{y2'} = -\varepsilon_{z2'} = -\varepsilon''; u_{z2'} = \varepsilon''(l - y);$$

$$u_{z2'} = \varepsilon'' z; \gamma_{xz2'} = 0,$$

где $\varepsilon'' = \frac{b_{\text{u}}}{2(l - l_{\text{u}})} \varepsilon$; ε , γ , u — относительные линейные, сдвиговые и абсолютные деформации

элементарных объемов заготовки на соответствующих участках.

Для участков I и I' интенсивность деформаций сдвига: $\Gamma_1 = \Gamma_{I'} = 2\varepsilon$, а для участков II и II': $\Gamma_2 = 2\varepsilon'$; $\Gamma_{2'} = 2\varepsilon''$.

На второй стадии прошивки:

работа внутренних сил на участке I:

$$A_1 = 4\tau_s \int_0^{h_x} \int_0^{b_{II}} 2\varepsilon(x + l_{II} - b_{II}) dx dz = \\ = 4\tau_s \Delta h b_{II} (2l_{II} - b_{II});$$

работка касательных напряжений сил трения под пуансоном на участке I:

$$A_2 = 4\psi \tau_s \int_0^{l_{II}-b_{II}} \int_0^{b_{II}} \varepsilon x dy dx + \\ + 4\psi \tau_s \int_{l_{II}-b_{II}}^{x+l_{II}-b_{II}} \int_0^{b_{II}} \varepsilon (x - y + l_{II} - b_{II}) dy dx = \\ = \frac{2}{3} \psi \tau_s \frac{\Delta h}{h_x} b_{II}^2 (3l_{II} - 2b_{II});$$

работка касательных напряжений перерывающих сил на поверхности $z_1 = 0$ между участками I и IV:

$$A_3 = 4\tau_s \int_0^{l_{II}-b_{II}} \int_0^{b_{II}} \varepsilon x dy dx + \\ + 4\tau_s \int_{l_{II}-b_{II}}^{x+l_{II}-b_{II}} \int_0^{b_{II}} \varepsilon (x - y + l_{II} - b_{II}) dy dx = \\ = \frac{2}{3} \tau_s \frac{\Delta h}{h_x} b_{II}^2 (3l_{II} - 2b_{II}),$$

где τ_s — интенсивность касательных напряжений или постоянная пластичности $k = \tau_s$; $\psi = \frac{\tau}{\tau_s} = \mu + \frac{1}{8} \frac{b_{II}}{h_{II}} (1 - \mu) \sqrt{\mu}$ — характеристика контактного трения; μ — коэффициент трения.

Аналогичным образом определяется работа внутренних сил на участках II, II' и I'; работа сил трения по вертикальным участкам $x = \pm b$ и $y = \pm l$; работа сил среза по вертикальной поверхности на границе I и II, II и III, II и IV, I' и II', II' и III', а также участков II' и IV', на поверхности $z = 0$ между участками I' и IV'; работа сил трения под пуансоном на участке I', на поверхности матрицы и пояска пуансона в зонах III и III'. Таким образом, получаем 16 компонентов работ от сил деформирования.

Просуммировав полученные работы, сделав замену:

$$(b - b_{II}) = (l - l_{II}) = a,$$

так как толщина стенок детали постоянна по периметру, получим выражение для суммарной работы:

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{16} A_i = 4\tau_s \Delta h l_{II} b_{II} \times \\ \times \left\{ 4 + \sqrt{3} \psi \frac{t}{a} + \frac{b_{II}}{h_x} \left[\frac{\psi + 1}{6} (3 - \lambda) + \frac{a}{b_{II}} \right] + \right. \\ \left. + \frac{h_x}{2a} \left(\psi + \frac{b}{b_{II}} + \frac{l}{l_{II}} - 1 \right) \right\},$$

где $\lambda = b_{II}/l_{II}$ — относительная длина коробки.

Учитывая, что

$$A_{\Sigma} = P \Delta h = 4p l_{II} b_{II} \Delta h; \tau_s = \sigma_s / \sqrt{3}; \sigma_s^* = 2\sigma_s / \sqrt{3},$$

где σ_s — напряжение текучести материала; $\sigma_s^* = 2k = 2\tau_s$, можно вычислить силу выдавливания P и контактное давление на пуансоне p .

Контактное давление на второй стадии процесса определяют из выражения:

$$p_{II} = \sigma_s^* \left\{ 2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \psi \frac{t}{a} + \frac{b_{II}}{2h_x} \left(\frac{\psi + 1}{6} (3 - \lambda) + \frac{a}{b_{II}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{h_x}{4a} \left(\psi + \frac{b}{b_{II}} + \frac{l}{l_{II}} - 1 \right) \right\}, \quad (1)$$

а глубину очага пластической деформации в жесткопластической среде — на основе принципа минимума энергии деформации ($\partial A_{\Sigma} / \partial h_x = 0$):

$$h_x = \\ = \sqrt{2ab_{II} \left[\frac{\psi + 1}{6} (3 - \lambda) - \frac{a}{b_{II}} \right] / \left(\psi + \frac{b}{b_{II}} + \frac{l}{l_{II}} - 1 \right)}. \quad (2)$$

На основании условия $h_x = h_{II}$, а также условия несжимаемости для принятой схемы течения осуществляется переход от второй стадии процесса к третьей. При этом работы для третьей стадии рассчитываются так же, как и для второй стадии процесса, за исключением замены h_x на h_{II} , и вместо работы

касательных напряжений, возникающих за счет сил среза, действующих на поверхности $z = 0$, вводится работа касательных напряжений сил трения. С учетом указанных изменений получено выражение для контактного давления на третьей стадии процесса закрытой прошивки:

$$p_{III} = \sigma_s^* \times \\ \times \left\{ 2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \psi \frac{t}{a} + \frac{b_{II}}{2h_{II}} \left[\frac{\psi}{3} (3 - \lambda) + \frac{a(1 + \psi)}{2b_{II}} \right] + \right. \\ \left. + \frac{h_{II}}{4a} \left(\psi + \frac{b}{b_{II}} + \frac{l}{l_{II}} - 1 \right) \right\}. \quad (3)$$

Результаты исследования. Рассмотрим результаты аналитического расчета контактных давлений при закрытой прошивке заготовок из алюминия АД1. В расчете принято, что длина матрицы (заготовки) $2l = 50$ мм, ширина матрицы (заготовки) $2b = 25$ мм, высота заготовки $h_0 = 9$ мм. Длина пуансона $2l_{II} = 46$ мм, его ширина $2b_{II} = 21$ мм. Коэффициент трения между контактными поверхностями постоянный и равен $\mu = 0,2$.

На рис. 2 показаны зависимости контактных давлений на пуансоне, рассчитанные по аналитическим зависимостям (1)–(3) (кривая 1) и полученные в результате эксперимента (кривая 2). Анализ результатов теоретического исследования и опытных данных показал, что на второй стадии процесса отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает ~10 % [3, 6].

На третьей стадии наблюдаются существенные расхождения между расчетными и опыт-

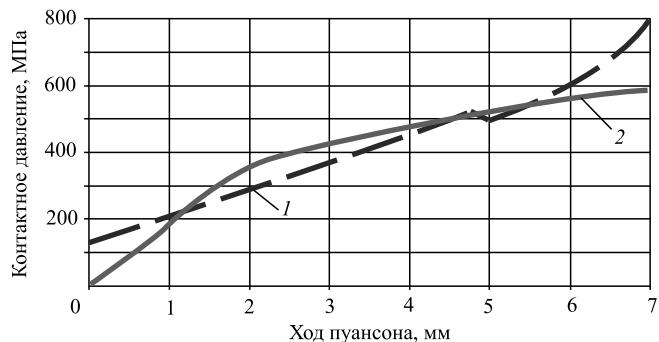


Рис. 2. Зависимость контактного давления на пуансоне от хода пуансона:

1 — расчетные данные; 2 — опытные данные

ными данными и на заключительной стадии процесса достигают ~25 %. Такое расхождение связано с неточным определением некоторых параметров, например коэффициента трения, так как смазка может выдавливаться из подпуансонной зоны.

Заключение. В результате теоретических исследований выведены аналитические зависимости для определения сил деформирования и контактных давлений, действующих на инструмент на любой стадии процесса закрытой прошивки неосесимметричных деталей коробчатой формы. Полученные аналитические зависимости можно применять для расчета сил деформирования и давлений, действующих на инструмент при закрытой прошивке, так как результаты аналитического расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие: в 2 т. Т. 2 / А.Л. Воронцов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 441 с.
2. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов / Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов, Н.Н. Довженко и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 224 с.
3. Семёнов И.Е., Иванов А.В. Сравнение аналитических и численных методов расчета технологических параметров процесса закрытой прошивки коробчатых деталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 12. С. 29—35.
4. Обработка материалов давлением: учеб. пособие / Ф.А. Гарифуллин, Г.С. Дьяконов, В.Г. Кузнецов. Казань: КНИТУ, 2012. 196 с.
5. Семёнов И.Е. Разработка ресурсосберегающих технологий и оборудования для холодной штамповки коробчатых деталей: автореф. дис. ... д-р техн. наук: 05.03.05. М., 1996. 32 с.
6. Семёнов И.Е., Иванов А.В. Математическое моделирование процесса закрытой прошивки коробчатых деталей // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: тематич. сб. науч. тр. Краматорск: ДГМА, 2007. С. 151—156.

Иван Евгеньевич Семёнов, д-р техн. наук;
Андрей Владимирович Иванов, канд. техн. наук,
avivanov@bmstu.ru

Ю.К. Филиппов, Д.А. Глазунов
(Московский политехнический университет)

Исследование параметров формообразования при холодной высадке стержневых деталей с прямоугольной в плане головкой

Исследован процесс высадки детали с прямоугольной в плане головкой методом холодной объемной штамповки. Приведено сравнение результатов, полученных экспериментальным путем и в программе QForm 3D.

Ключевые слова: сила высадки; болт с прямоугольной головкой; эксперимент; программа QForm 3D.

The heading process of rectangular-head part by cold forging is studied. Comparison of the results obtained experimentally and in the QForm 3D program is presented.

Keywords: heading force; rectangular-head bolt; experiment; QForm 3D program.

Холодная объемная штамповка обеспечивает высокую точность деталей и высокое качество поверхности, при этом повышаются надежность, износостойкость и долговечность деталей, снижается трудоемкость их изготовления. К недостаткам относятся высокие нагрузки на инструмент.

Большой класс деталей, производимых холодной объемной штамповкой, — это стержневые детали с утолщением, детали крепежа. Для изготовления штамповкой клеммного болта при высадке прямоугольной в плане головки в производстве используют метод горячей объемной штамповки [1–3].

Цель работы — получение методом холодной объемной штамповки клеммного болта при высадке прямоугольной в плане головки. Задачи исследования: определение энергосиловых характеристик формообразования заготовки клеммного болта при высадке прямоугольной в плане головки в зависимости от формы и геометрических размеров головки; подтверждение того, что формообразование клеммного болта при высадке прямоугольной в плане головки предпочтительнее процессом холодной объемной закрытой высадки; проведение моделирования основных формообразующих операций в программе QForm 3D, подтверждающих работоспособность предлагаемого разработанного технологического процесса холодной объемной штамповки заготовки клеммного болта при высадке прямоугольной в плане головки.

На основе анализа формы и размеров клеммного болта и процессов холодной объемной штамповки разработан технологический процесс производства клеммного болта на автоматах для холодной объемной штамповки. При разработке технологических процессов холодной объемной штамповки такого типа болтов основная сложность заключается в нетрадиционной, прямоугольной в плане форме их головки [4, 5].

Предлагаемый технологический процесс штамповки клеммного болта на четырехпозиционном холодновысадочном автомате состоит из следующих операций: отрезка заготовки; предварительная высадка головки с коническим набором; высадка в цилиндрической полости пуансона; высадка головки болта в матрице с полостью прямоугольной формы; объемная калибровка головки; накатка резьбы болта. Накатка резьбы на стержне болта осуществляется на резьбонакатном устройстве самого автомата [6].

Наиболее сложной операцией является высадка головки болта в матрице прямоугольной формы, что связано с большими пластическими деформациями при оформлении головки и значительными технологическими силами, необходимыми для формоизменения металла. Деформации могут достигать значений, превышающих запас пластичности материала. Для выяснения картины формообразования и заполнения полости инструмента в процессе штамповки было проведено моделирова-



Рис. 1. Испытательная машина EU-100 и экспериментальный штамп для высадки стержневой детали

ние процесса методом конечных элементов на ЭВМ [7].

Для использования полученных результатов анализа силовых параметров и общей картины формообразования при высадке прямоугольной в плане головки болта, полученной в программе QForm 3D, необходимо оценить достоверность результатов.

Для сравнения результатов математического моделирования с результатами, полученными конечно-элементным моделированием и опытными данными при высадке прямоугольной в плане головки болта, была проведена опытная штамповка в экспериментальном штампе на испытательной машине EU-100 с максимальной силой смыкания 1 МН (рис. 1). В качестве исходного материала заготовки использовали алюминий АД1 (рис. 2).

Заготовку смазывали графитовой смазкой и помещали в штамп, после чего начинали измерение силы в зависимости от движения пуансона до конечной стадии формообразования головки болта. Также измеряли радиус в углах

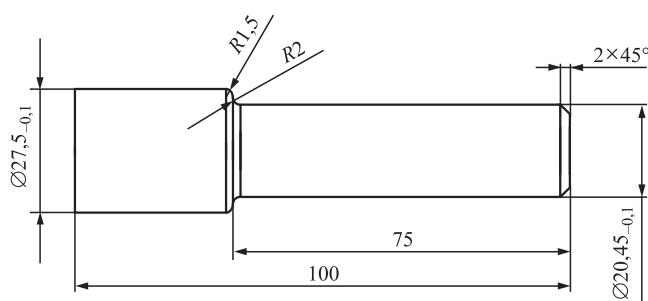


Рис. 2. Заготовка для проведения эксперимента

после соприкосновения металла со стенками матрицы в процессе заполнения прямоугольной головки болта.

В результате экспериментов был получен график "сила—ход пуансона" (рис. 3, а). Значения силы в зависимости от хода пуансона приведены в табл. 1, значения радиуса заготовки после соприкосновения с двумя стенками матрицы до полного формообразования головки — в табл. 2.

Результаты экспериментов показали, что чем меньше радиус заготовки, тем необходима большая сила высадки для заполнения металлом формы головки болта.

На рис. 3, б видно, что характер графика "сила—ход пуансона" ("нагрузка—расстояние"), полученный в программе QForm 3D, не отличается от графика, полученного при высадке натурного образца. Единственное отличие — это максимальное значение силы высадки, что связано с различными характеристиками материалов: стали 10 и алюминия АД1. Предел текучести стали 10 $\sigma_{0,2} = 210$ МПа, предел текучести АД1 $\sigma_{0,2} = 60$ МПа. Предел текучести стали 10 в 3,5 раза выше алюминия АД1.

Из рис. 4 видно, что при формообразовании головки болта металл полностью заполнил полость матрицы, в том числе и радиусы при углах.

На рис. 5 показаны исследуемые технологические процессы получения заданной детали.

Исходя из полученных технологических процессов, переносим параметры технологических переходов в конечно-элементную

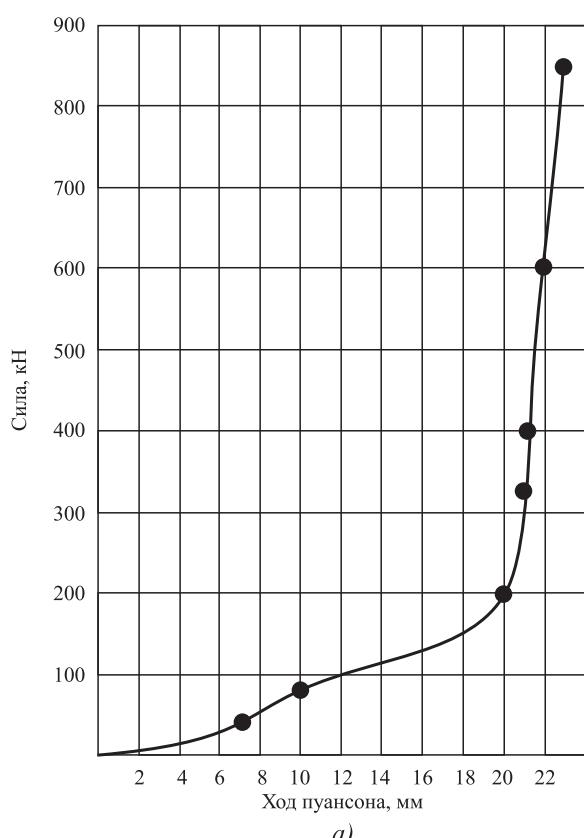
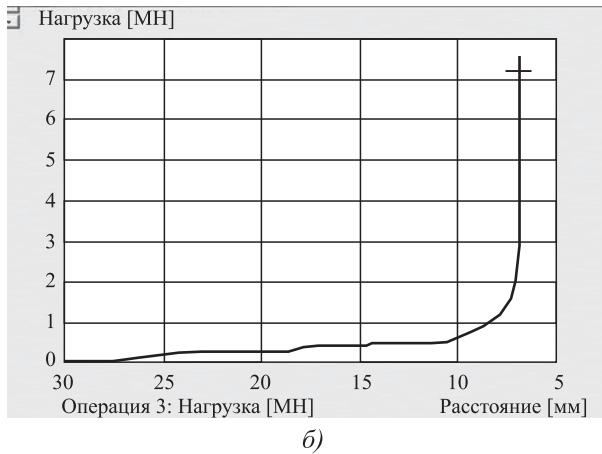
*a)**б)*

Рис. 3. График "сила—ход пuhanсона", полученный в результате эксперимента (а) и в программе QForm 3D (б):
а — алюминий АД1; б — сталь 10

систему QForm 3D. Это позволит определить такие значения деформации и кинематики течения металла на каждой технологической операции, при которых работа деформирования будет минимальной, а также оценить физико-механическое состояние деформируемого металла в каждой точке очага деформации.

На рис. 6 (см. обложку) и 7 показаны результаты моделирования технологического процесса, где в первую очередь из стержневой заго-

1. Результаты экспериментов

Номер измерения	Сила, кН	Ход пuhanсона, мм
1	40	7
2	80	10
3	200	20
4	325	21
5	400	21,5
6	600	22
7	850	24,9

2. Формирование радиуса скругления в ходе движения пuhanсона

Номер измерения	Сила, кН	Ход пuhanсона	Радиус скругления
		мм	мм
1	170	18	12
2	325	21	7,5
3	600	22	5

товки формируется стрежневая деталь с прямоугольной в плане головкой. Такая технология состоит из четырех переходов: предварительная высадка головки с коническим набором; высадка в цилиндрической полости пuhanсона; высадка головки болта в матрице с полостью прямоугольной формы; объемная калибровка головки болта. Материал заготовки сталь 10; коэффициент трения 0,09; температура окружающей среды и заготовки на каждом переходе 20 °С. Деформация производится в механическом прессе силой 10 МН.

Высадка деталей с прямоугольной в плане головкой (3-я операция рекомендуемого технологического процесса штамповки болтов на автомате) требует значительных удельных сил —



Рис. 4. Заготовка после высадки

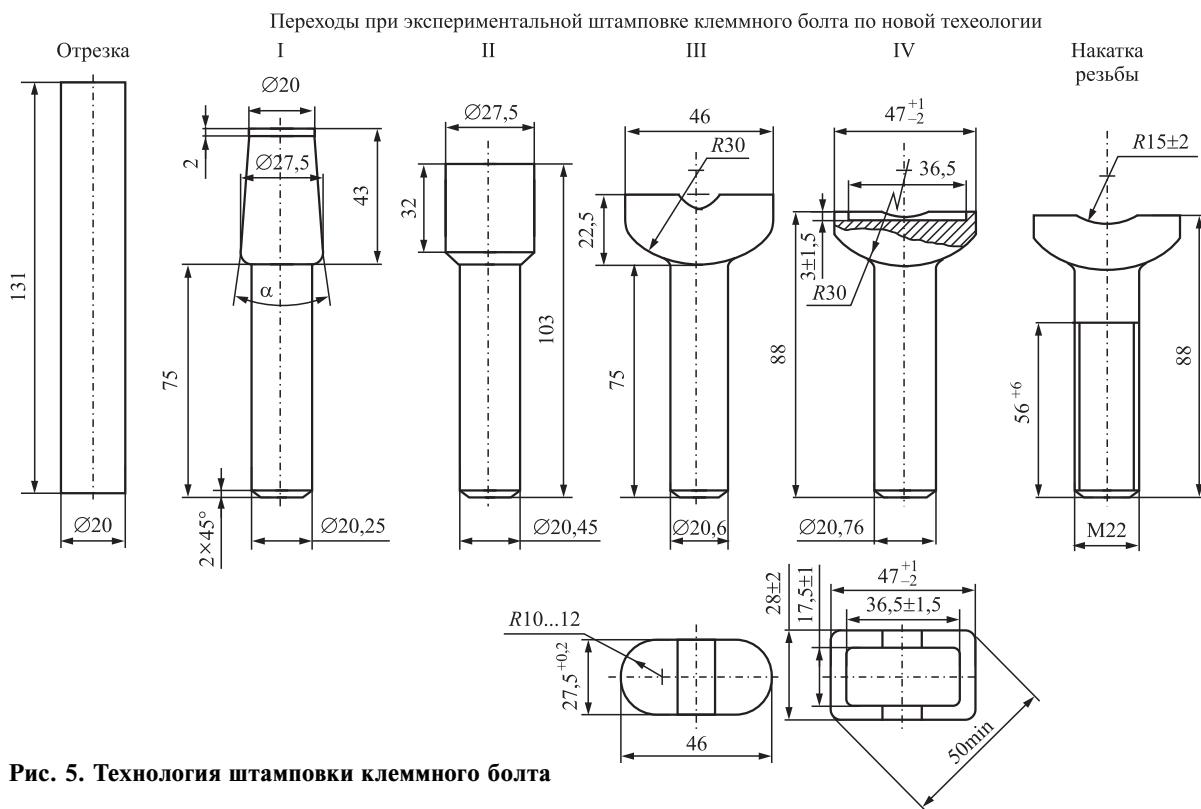


Рис. 5. Технология штамповки клеммного болта

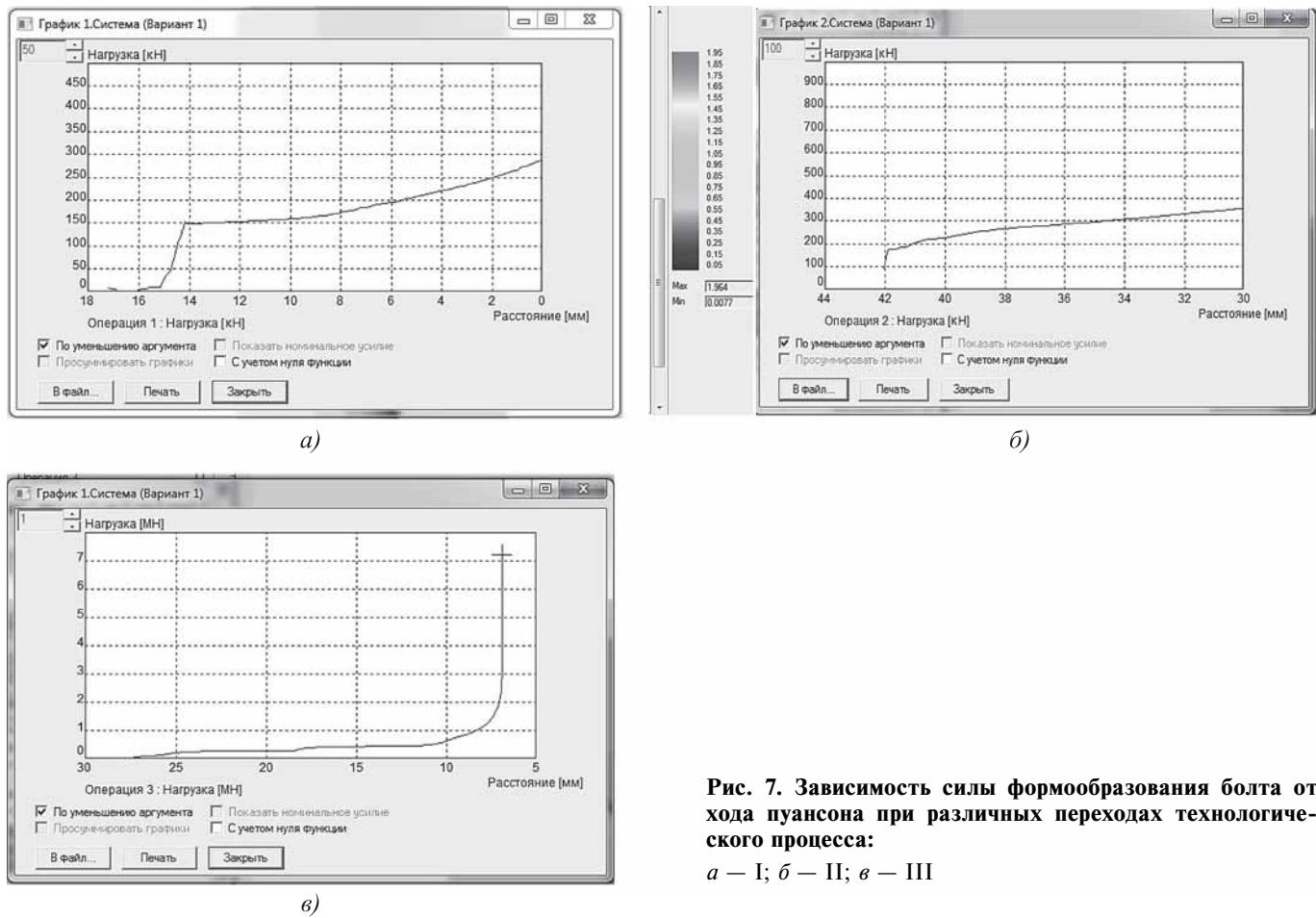


Рис. 7. Зависимость силы формообразования болта от хода пuhanсона при различных переходах технологического процесса:

a — I; *б* — II; *в* — III

намного выше, чем высадка круглых головок. При этом отмечено, что наибольшее влияние на силу оказывает радиус скругления головки. В то же время прямоугольный пуансон подвергается интенсивному износу, а именно его угловые элементы изнашиваются в первую очередь.

Из рис. 8 (см. обложку) видно, что при высадке преобладают растягивающие напряжения. Это связано с тем, что в головке металла течет в стороны и стержневую часть.

Во время заполнения полости штампа сила высадки медленно и постепенно увеличивается до соприкосновения металлом двух стенок ма-

трицы, после чего металл начинает затекать в радиусы матрицы, в этот момент сила высадки значительно возрастает и достигает 750 кН к моменту полного заполнения матрицы.

При экспериментальной проверке предлагаемого технологического процесса штамповки болтов регистрировали максимальные технологические силы и вычисляли максимальные силы на инструмент, которые составляют:

Номер перехода	I	II	III
Сила, кН	308	374	1863

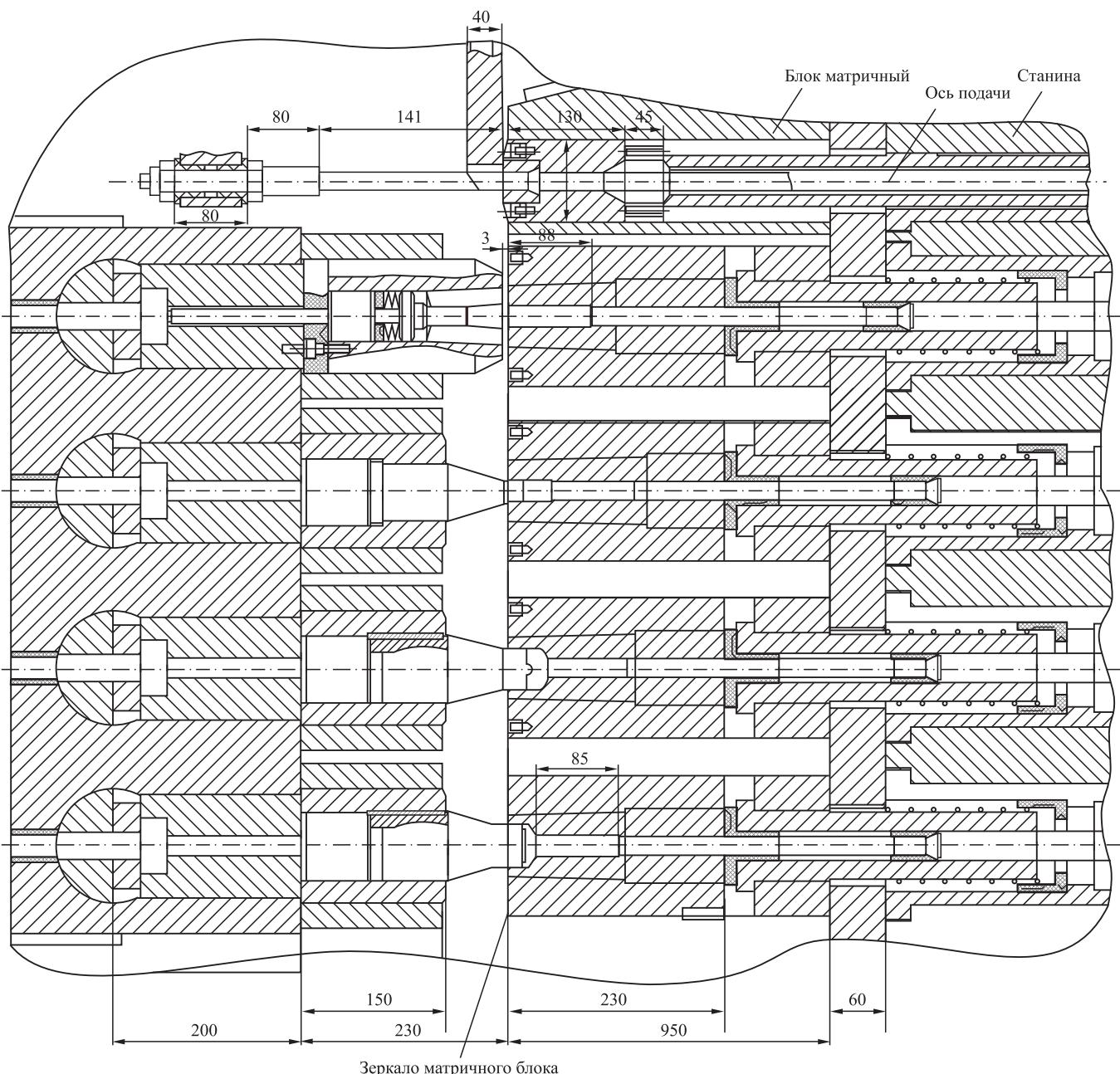


Рис. 9. Многопозиционный штамп для изготовления детали "клеммный болт"

После лабораторных исследований и отработки технологии были спроектированы и изготовлены производственные штампы для многопозиционных автоматов. Многие детали из экспериментального штампа были использованы в производственных штампах. Исходя из условий крупносерийного производства и для экономии средств, было решено изготавливать один универсальный блок со сменными пакетами для двух операций выдавливания. Это позволило существенно сократить затраты времени и ресурсов. Конструкция позволяет за небольшое время заменить пакеты с рабочими частями штампа.

На рис. 9 представлен штамп с пакетом для всех операций высадки детали "клеммный болт". Универсальность его конструкции позволяет использовать блок штампа для других операций путем замены основных рабочих деталей.

Заключение. При моделировании процесса высадки методом конечных элементов (QForm) получены завышенные результаты (в среднем на 10...15 %) в сравнении с результатами, полученными в результате экспериментов с натуральными образцами.

Кривые зависимости максимальной деформирующей силы (в конце хода), полученные экспериментально и методом конечных элементов (QForm), практически совпадают. Полученные данные позволяют оценить изменение силы штамповки при высадке прямоугольной в плане головки.

Сила деформирования начинает заметно возрастать при заполнении металла в радиусы матрицы угловой части, это наглядно видно в результате эксперимента и данных, полученных в QForm 3D.

Результаты моделирования показали, что при практически равных показателях с экспериментальными (максимальная сила 3000 кН, степень деформации 4,75) для получения детали "клеммный болт" в условиях серийного производства технология применима и может

быть использована. Такие выводы сделаны исходя из формообразования перехода III. При высадке прямоугольной в плане головки получена деталь с заполненными металлом радиусами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

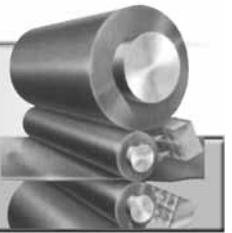
1. Совершенствование инструмента и математическое моделирование процесса формирования головок фланцевых болтов / В.И. Кадошников, Е.С. Решетникова, Л.В. Решетников, С.В. Кочуков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2008. № 2. С. 52–56.
2. Молодов А.В., Филиппов Ю.К. Моделирование процессов холодного комбинированного выдавливания полусферических деталей с фланцем // Кузнецко-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 5. С. 27–30.
3. Филиппов Ю.К., Игнатенко В.Н., Рагулин А.В. Экспериментальные исследования кинематики течения металла при комбинированном радиальном и обратном выдавливании осесимметричных деталей с фланцем в коническом инструменте // Кузнецко-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 9. С. 33–37.
4. Research of deformation and stress state schemes for steel hardness / Yu.K. Filippov, Yu.G. Kalpin, A.V. Ragulin, A.G. Zaicev // New developments in forging technology: papers of the International Conference. Frankfurt am Main, June 4–5, 2013. P. 281–291.
5. Developing of technological process for the cold forging of thin-walled bushes with regard of plastic properties / Yu.K. Filippov, Yu.G. Kalpin, A.V. Ragulin, A.G. Zaicev, Yu.N. Anfimov // 46th ICFG Plenary Meeting September, 15–18, 2013. Paris, France.
6. Калпин Ю.Г., Филиппов Ю.К., Гипп Л.Б. Высадка стержневых деталей с прямоугольной в плане головкой // Известия ТулГУ. Серия: Механика деформированного тела и обработка металлов давлением. 2000. Вып. 2. С. 39–43.
7. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала / С.А. Типалин, Н.Ф. Шпунькин, М.Ю. Никитин, А.В. Типалина // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2010. № 1. С. 166–170.

Юлиан Кириллович Филиппов, д-р техн. наук,

yulianf@mail.ru;

Дмитрий Александрович Глазунов





УДК 621.77.014

Д.С. Лисовенко¹, М.А. Полякова², А.Ю. Столяров³, А.Е. Гулин², О.А. Никитенко²

¹ Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,

² Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова,
ОАО "Магнитогорский метизно-калибровочный завод "ММК-МЕТИЗ")

Особенности контактного взаимодействия высокоуглеродистой проволоки с волокой при комбинированном волочении с кручением*

Приведены результаты исследования особенностей контактного взаимодействия высокоуглеродистой проволоки с волокой при комбинированной деформационной обработке волочения с кручением. В ходе моделирования определены особенности напряженно-деформированного состояния обрабатываемой проволоки на контакте с волокой при различных режимах комбинированной деформационной обработки. Изучены особенности микроструктуры высокоуглеродистой проволоки из стали с содержанием углерода 0,7 % на контактной поверхности и микротвердость методом наноиндентирования при различных режимах комбинированного волочения с кручением.

Ключевые слова: высокоуглеродистая проволока; комбинированная деформационная обработка; волочение; кручение; контактная поверхность; белый слой.

Study results of the peculiarities of contact interaction between high carbon steel wire and die at combined deformational processing by torsion drawing are presented. Specificity of stress-strain state of the processed wire on contact surface with the die at different modes of combined deformational processing is stated. Microstructure of high carbon steel with 0.7 % C contact surface and microhardness by indentation test after different modes of drawing and torsion combination are studied.

Keywords: high carbon steel; combined deformational processing; drawing; torsion; contact surface; white layer.

В технологических процессах обработки металлов давлением (ОМД), особенно в процессах, для которых характерно действие реактивных сил трения (волочение, экструзия, прессование), вблизи поверхности контакта системы обрабатываемый материал—инструмент образуется тонкий слой, отличающийся по характеру течения и свойствам от основного объема материала [1].

Обзор процессов деформации, для которых характерно образование слоя, приведен в работах [2, 3]. Особенно важно проявление этого слоя при волочении проволоки тонких

диаметров, когда влияние слоя на свойства проволоки становится существенным. Такую тонкую проволоку широко применяют при производстве тонких канатов, в частности металлокорда, сеток для фильтров, электроприборов, медицинских аппаратов, часовых механизмов и т.п.

Несмотря на то что свойства тонкой проволоки во многом зависят от характера течения металла в поверхностном слое, в классической теории волочения данный слой, как обособленный элемент очага деформации, не рассматривается.

Поверхностный слой в классических процессах ОМД и, в частности при волочении проволоки, как предмет исследований, рас-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18-19-00736.

сматривается с позиции феноменологического подхода механики сплошных сред. Наиболее четко этот подход сформулирован в работе [4], где отмечено, что толщина приконтактного слоя, в котором локализуются знакопеременные деформации от взаимодействия шероховатостей контактирующих поверхностей, составляет 1–2 высоты микронеровностей R_z .

Таким образом, учитывая, что при волочении показатели шероховатости волочильного инструмента и протягиваемой проволоки составляют не более 1...2 мкм, следует предположить, что толщина приконтактного слоя в процессе волочения равна 2...4 мкм. В настоящее время установлено только наличие самого слоя. При этом недостаточно данных о влиянии параметров процесса волочения, таких как форма очага деформации, суммарная деформация, скорость волочения, коэффициент трения, свойства исходного материала на глубину слоя и характер течения материала в нем. Также недостаточно данных о влиянии слоя на прочностные и пластические свойства готовой проволоки, ее структуру.

Известно, что разрушение проволоки при ее эксплуатации непосредственно или в каких-либо изделиях (канаты, сетка и т.д.) начинается именно с поверхности. По этой причине тонкий поверхностный слой может служить барьером, препятствующим зарождению дефектов, и во многом способствовать повышению эксплуатационных характеристик проволоки.

Отдельное внимание необходимо уделить изменению структуры металла в тонком приповерхностном слое при волочении проволоки, поскольку для проволоки с низким содержанием углерода поведение слоя и его влияние на свойства проволоки, вероятно, будут иметь различный характер в отличие от проволоки с высоким содержанием углерода [5, 6].

Для высокоуглеродистой проволоки характерна особая структура с расположением пластин цементита в ферритной матрице, поведение которых в тонком приповерхностном слое имеет определенные особенности. По этой причине возникает необходимость проведения дополнительных исследований влияния условий волочения на глубину поверхностного слоя, его структуру и свойства высокоуглеродистой проволоки.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что при волочении проволоки на границе раздела прово-

лока—волочильный инструмент образуется тонкий слой глубиной 20...40 мкм, интенсивность деформации материала в котором выше по сравнению с деформацией остального сечения [7–9]. Толщина этого слоя является постоянной и не зависит от диаметра проволоки. Слой образуется в результате действия трения и характеризуется высокой интенсивностью деформации и разориентировкой зерен. Показано, что глубина слоя не зависит от изменения угла волочильного инструмента, однако его свойства (прочность, определяемая методом послойного стравливания) повышается с уменьшением угла рабочей зоны волоки (увеличением длины контактной поверхности).

Также важны исследования, выполненные для трибологической системы тело—контртело, когда при контактном взаимодействии двух тел ни одно из них не находится в состоянии пластического течения. Несмотря на то что работы эти направлены на исследование контактного взаимодействия тел, которые не находятся в стадии пластического течения, некоторые физические явления, обнаруженные в данных исследованиях, могут быть полезны.

Комплекс экспериментальных исследований был проведен на установке, обеспечивающей комбинированное деформационное воздействие на проволоку. В основе конструкции использованы способ и устройства для получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со знакопеременным изгибом с кручением [10–12].

Устройство представляет собой станину, с установленными в ней волокодержателями, в которых неподвижно закреплены две волоки. Стальная проволока заправляется в первую по ходу ее движения неподвижно закрепленную коническую волоку и далее направляется в блок роликов, обеспечивающий знакопеременный изгиб проволоки. Далее она поступает во вторую неподвижно закрепленную и расположенную соосно с первой конической волоку меньшего диаметра.

Такое расположение деформирующего инструмента различной конструкции позволяет комбинировать различные схемы пластической деформации: растяжение и сжатие при прохождении проволоки через волоки с коническим очагом деформации, изгиб и кручение. При этом одновременно с деформацией волочением в зоне между волоками проволока под-

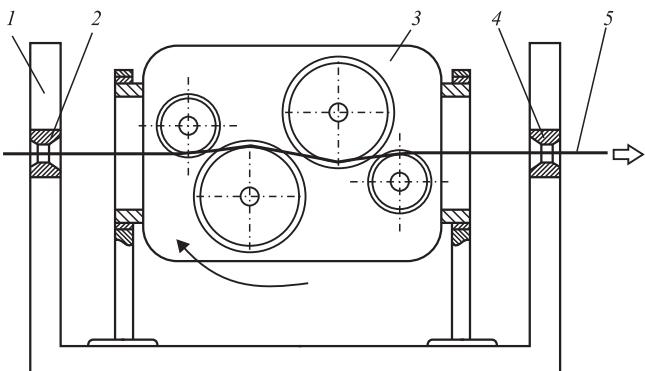


Рис. 1. Принципиальная схема установки, обеспечивающей комбинированное волочение с кручением:

1 — станина; 2, 4 — волоки; 3 — четырехроликовое устройство; 5 — проволока (стрелкой показано направление движения проволоки)

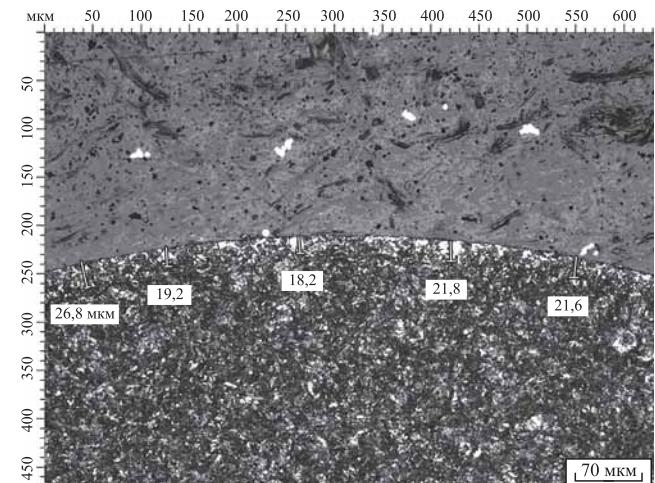


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя патентированной высокогородистой проволоки из стали 70 диаметром 3,0 мм в исходном состоянии

вергается дополнительной деформации сдвигом за счет вращения системы роликов вокруг продольной оси, обеспечивающей совместный знакопеременный изгиб и кручение.

В ходе эксперимента ролики в блоке были установлены таким образом, чтобы исключить деформацию проволоки изгибом (рис. 1). Поэтому при прохождении проволоки через волоки осуществляется деформация растяжением и сжатием, а кручение блока роликов обеспечивает деформацию скручиванием.

В качестве объекта исследования была выбрана проволока диаметром 3,0 мм из высокогородистой стали 70 после патентирования. Химический состав стали 70 приведен в таблице.

Связь внешнего трения со структурой поверхности обрабатываемого металла выражается, например, в характерном изменении формы зерен, которые вытягиваются в направлении приложения внешней силы (силы прокатки, волочения и др.). Силовые и кинематические условия на контактных поверхностях обуславливают характерное напряженное и деформированное состояние обрабатываемого металла, что приводит к изменению микроструктуры поверхностного слоя, а следовательно, и его механических свойств, прежде всего микротвердости. На рис. 2 приведена микроструктура поверхности

Содержание химических элементов стали 70, % мас.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
Не более							
0,72...0,8	0,17...0,37	0,5...0,8	0,25	0,035	0,035	0,25	0,2

высокогородистой проволоки из стали 70 диаметром 3,0 мм после патентирования.

Как известно, сталь 70 относится к сталям перлитного класса, который представляет собой эвтектоидную смесь чередующихся пластин мягкого феррита и твердого цементита. Из рис. 2 видно, что на поверхности проволоки в исходном состоянии наблюдается белый слой толщиной в среднем 21,52 мкм. Наличие этого слоя в микроструктуре проволоки в исходном состоянии объясняется тем, что для проведения исследований была взята проволока после волочения катанки с диаметром 5,5 мм до диаметра 3,0 мм, что и привело к формированию на ее поверхности слоя, не поддающегося травлению, который в научной литературе называется "белый слой".

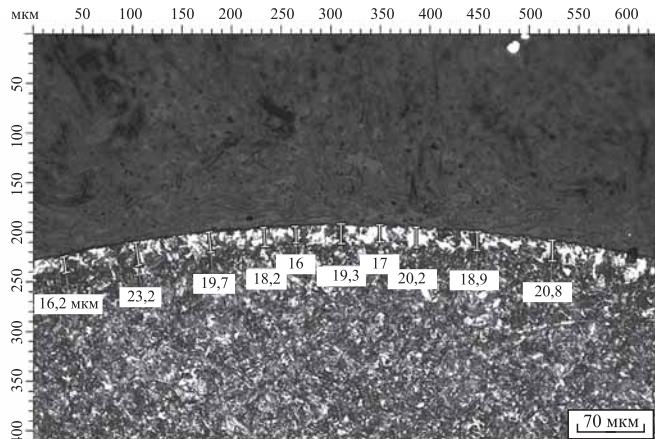
Для изучения особенностей напряженно-деформированного состояния высокогородистой проволоки при различных видах деформационного воздействия волочением с кручением было проведено моделирование в программном комплексе Deform-3D (лицензия Machine 38808) для различных технологических параметров деформационной обработки. Скорость кручения варьировали от 0 до 150 мин⁻¹ с шагом 50 мин⁻¹.

Напряженно-деформированное состояние проволоки из стали 70 при волочении без кручения выходного конца и при кручении представлено на рис. 3 (см. обложку). На рис. 4 (см. обложку) приведены результаты моделирования при различных значениях диаметра обрабатываемой проволоки.

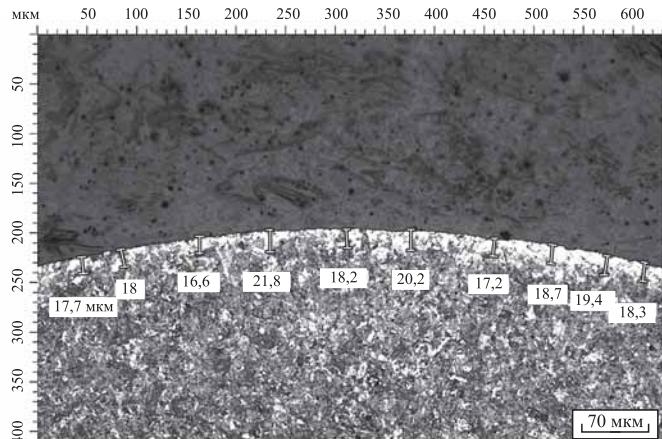
Известно, что в процессах обработки металлов давлением в результате трения поверх-

ности инструмента и обрабатываемой заготовкой возникают нормальные и касательные напряжения. Силы внешнего трения при пластической деформации определяют величину и распределение нормальных напряжений по контактной поверхности, равнодействующая которых составляет силу, необходимую для осу-

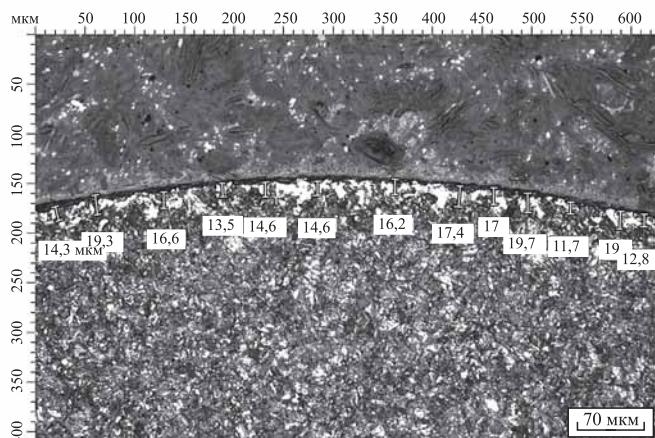
ществления процесса обработки. Сила трения обуславливает неравномерность распределения деформации по объему обрабатываемой заготовки. На рис. 5 показаны структуры поверхности высокоуглеродистой проволоки из стали 70 после различных степеней деформации волочением с различной скоростью кручения.



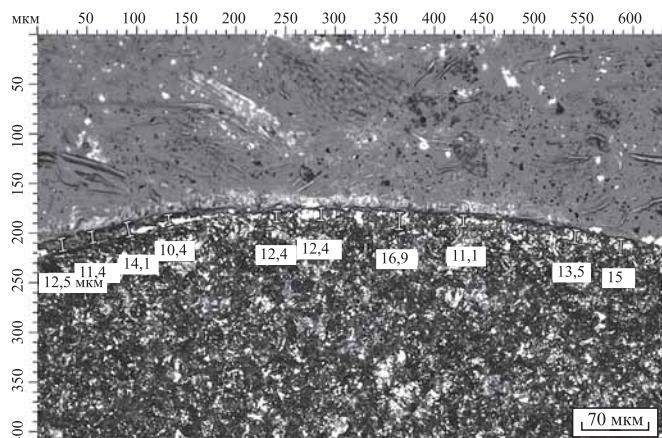
а)



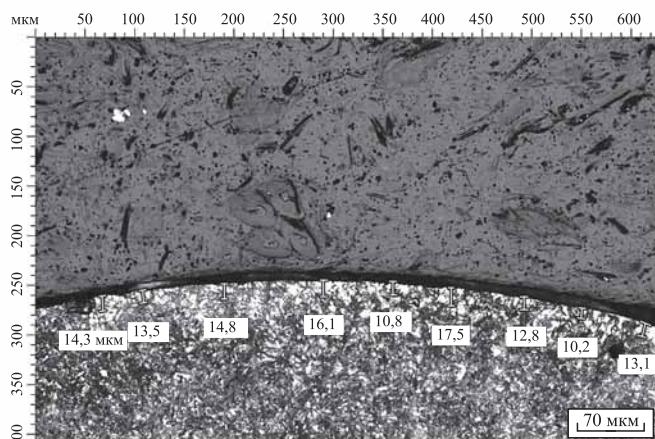
б)



в)



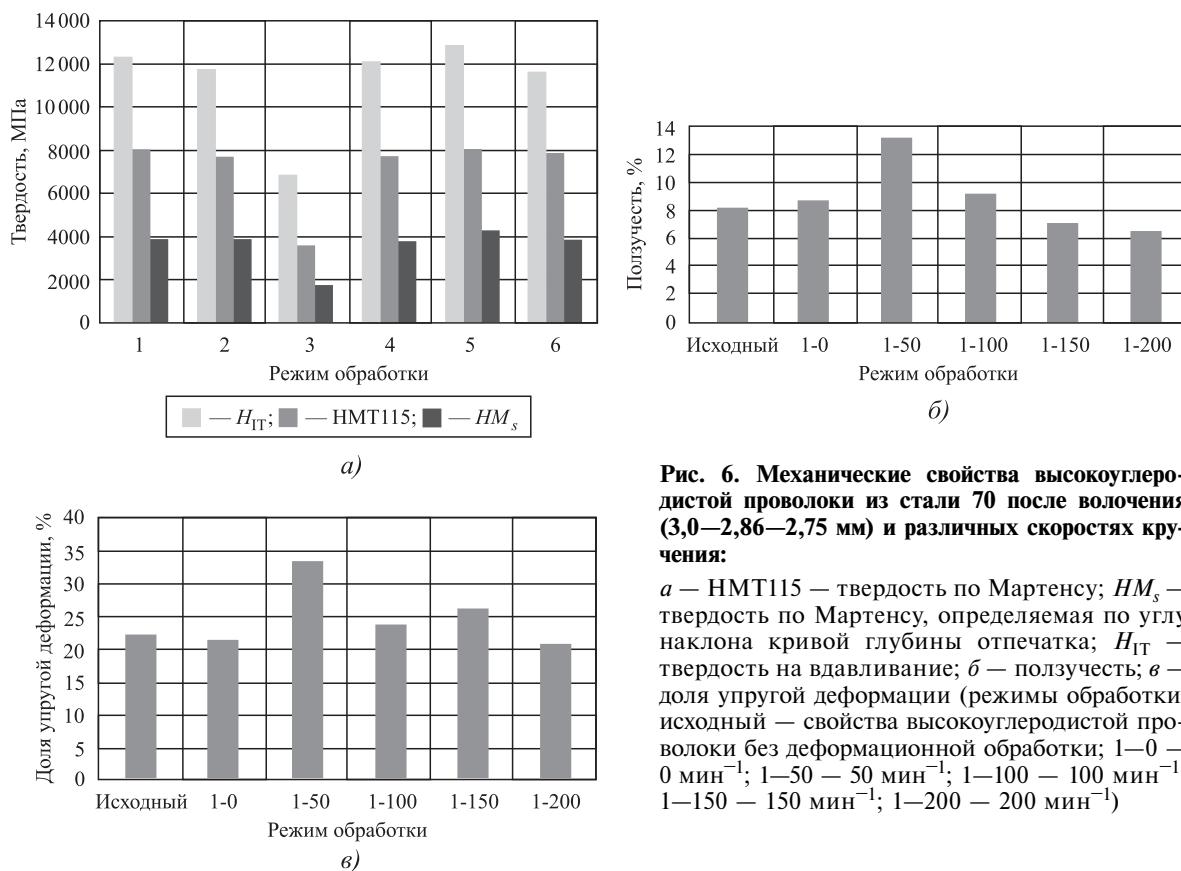
г)



д)

Рис. 5. Микроструктуры поверхности высокоуглеродистой проволоки из стали 70 после различных видов деформационного воздействия:

а — волочение 3,0—2,86—2,75 мм; *б* — волочение с кручением 50 мин^{-1} ; *в* — 100 мин^{-1} ; *г* — 150 мин^{-1} ; *д* — 200 мин^{-1}



Из полученных данных видно, что при увеличении интенсивности деформационной обработки волочением с различной скоростью кручения толщина белого слоя уменьшается. При этом при повышении скорости кручения выходного конца на некоторых участках поверхности белый слой не наблюдается. Это можно объяснить тем, что при увеличении степени деформационной обработки перлитные колонии, находящиеся на поверхности обрабатываемой проволоки, могут ориентироваться таким образом, что становятся неразличимы методом оптической микроскопии.

Для изучения градиента механических свойств высококуглеродистой проволоки из стали марки 70 после различных видов деформационной обработки волочением с кручением использовали метод измерения микротвердости Берковича [13]. Для проведения анализа были выбраны структурно-зависимые свойства обрабатываемой проволоки, которые в значительной степени зависят от условий деформационного воздействия на контакте между инструментом и обрабатываемой заготовкой: HMT115 — твердость по Мартенсу; HM_s — твердость по Мартенсу, определяемая

по углу наклона кривой глубины отпечатка; H_{IT} — твердость на вдавливание; ползучесть и доля упругой деформации. Измерения проводили в направлении от поверхности проволоки на глубину 600 мкм (рис. 6).

Из полученных данных видно, что комбинирование волочения с кручением при скорости 50 мин^{-1} приводит к увеличению показателей пластичности поверхностного слоя высококуглеродистой проволоки. Однако при дальнейшем увеличении деформации скручиванием поверхностный слой упрочняется. Это можно объяснить тем, что при больших скоростях кручения в поверхностном слое накапливаются значительные сдвиговые деформации, что приводит к изменению формы и размеров зерен, характерному при обработке углеродистой стали методами комбинированного деформационного воздействия [14–20].

Выводы

- При уменьшении диаметра проволоки происходит рост удельной поверхности единицы объема, и поверхностные физические явления начинают преобладать над объемными, что следует

учитывать при описании контактного взаимодействия обрабатываемой проволоки с волокой.

2. Получены качественные данные о строении поверхностного слоя проволоки из высокоуглеродистой стали 70 после комбинированной деформационной обработки волочением с кручением.

3. Для изучения свойств поверхностного слоя использован метод инструментального индентирования, построены графики распределения различных параметров микротвердости на расстоянии до 600 мкм от поверхности. Поскольку характерной особенностью слоя является повышенная степень деформации, твердость слоя выше относительно низлежащих слоев.

4. Полученный массив экспериментальных результатов можно использовать для установления аналитических зависимостей контактной зоны между высокоуглеродистой проволокой и инструментом (волокой) при различных видах деформационной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Griffiths B.J. Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes // Journal of Tribology. 1987. July. Vol. 109. P. 525–530.

2. Александров С.Е., Гольдштейн Р.В. К построению определяющих уравнений в тонком слое материала вблизи поверхностей трения в процессах обработки материалов давлением // Доклады академии наук. 2015. Том 460. № 3. С. 283–285.

3. Александров С.Е., Гольдштейн Р.В. О подобии эволюции размера зерна вблизи поверхностей трения и в процессе равноканальной экструзии // Доклады академии наук. 2013. Т. 450. № 2. С. 162–165.

4. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1976. 416 с.

5. Гун Г.С., Чукин М.В., Емалеева Д.Г. и др. Исследование формирования субмикрокристаллической структуры поверхностного слоя стальной проволоки с целью повышения уровня ее механических свойств // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3. С. 84–86.

6. Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В., Никитенко О.А. Исследование состояния карбидной фазы послеnanoструктурирования и последующего волочения низкоуглеродистой стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 3. С. 45–48.

7. Effect of die semi-angle and multi-pass drawing on additional shear layer / K. Hosoda, M. Asakawa, S. Kajino, Y. Maeda // Wire Journal. 2008. November. P. 68–73.

8. Столяров А.Ю. Определение глубины слоя дополнительной сдвиговой деформации при волочении тонкой проволоки // Сталь. 2012. № 12. С. 45–47.

9. Kajino S., Asakawa M. Effect of "additional shear strain layer" on tensile strength and microstructure of fine drawn wire // Journal of Materials Processing Tech. 2006. Vol. 177. P. 704–708.

10. Пат. 2467816 Российская Федерация, МПК B21C 1/04, B21C 1/00. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Э.М. Голубчик, В.П. Рудаков, С.Е. Носков, А.Е. Гулин; заявитель и патентообладатель М.В. Чукин, М.А. Полякова, Э.М. Голубчик (RU). № 2011107637/02; заявл. 28.02.2011; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33.

11. Пат. 130525 Российская Федерация, МПК B21C 1/00. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой / М.А. Полякова, М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, А.Е. Гулин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова" (RU). № 2013104567/02; заявл. 04.02.2013; опубл. 27.07.2013, Бюл. 21.

12. Патент на полезную модель № 170774. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой / Э.М. Голубчик, М.А. Полякова, А.Е. Гулин. Заявка 2016129000. Дата гос. регистрации 10 мая 2017 г.

13. ГОСТ Р 8.748—2011 (ИСО 14577-1:2002). Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний.

14. Influence of hybrid plastic deformation on the microstructure and mechanical properties of carbon-steel wire / M. Chukin, M. Polyakova, A. Gulin // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. Iss. 8. P. 548–551.

15. The possibility of manufacturing long-length metal products with ultra-fine grain structure by combination of strain effects / M. Chukin, M. Polyakova, A. Gulin, O. Nikitenko // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 685. P. 487–491.

16. Effect of microstructure and mechanical properties formation of medium carbon steel wire through continuous combined deformation / M. Polyakova, I. Calliari, A. Gulin // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 716. P. 201–207.

17. Modern engineering techniques for designing materials with a specified set of properties / Polyakova M., E. Golubchik, Yu. Efimova, A. Gulin // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 724. P. 77–83.

18. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Состояние и направления развития непрерывных способов nanoструктурирования круглой проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 3. С. 69–73.

19. Усанов М.Ю., Харитонов В.А. Эффективность применения деформации кручения в способах производства nanoструктурированной проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. 14. № 4. С. 66–71.

20. Формирование структуры и свойств проволоки из углеродистых марок стали способами сдвиговой деформации / В.А. Харитонов, Ю.Ю. Ефимова, Е.Ю. Ямашева, М.Ю. Усанов // Павловские чтения. М.: ИМЕТ РАН, 2010. С. 600–602.

Дмитрий Сергеевич Лисовенко, канд. физ.-мат. наук, lisovenk@ipmnet.ru;

Марина Андреевна Полякова, д-р техн. наук;
Алексей Юрьевич Столяров, канд. техн. наук;
Александр Евгеньевич Гулин, канд. техн. наук;
Ольга Александровна Никитенко, канд. техн. наук

С.А. Котов, С.-В.Р. Музафарова, М.Г. Ливинцова
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Исследование процессов уплотнения порошков терморасширенного графита при прокатке

Исследованы процессы уплотнения порошков терморасширенного графита при прокатке для получения изделий с различными геометрическими параметрами. Показано, что за счет регулирования технологических параметров прокатки можно получать уплотнительные ленты из терморасширенного графита с заданными толщиной, плотностью и физико-механическими свойствами для использования при изготовлении различного оборудования в машиностроении. Разработана технология изготовления одно- и многослойных уплотнительных лент.

Ключевые слова: терморасширенный графит; уплотняемость; прокатка; пористость; многослойные ленты; порошковые материалы; композиционные материалы.

The compaction processes of the thermally expanded graphite powders during rolling in order to produce products with different geometrical parameters are studied. It is shown that by adjusting the rolling technological parameters, sealing tapes can be made from thermally expanded graphite with given thickness, density and physical and mechanical properties for use in the manufacture of various equipment in mechanical engineering. Technology for manufacturing of single and multi-layer sealing tapes is developed.

Keywords: thermally expanded graphite; compactibility; rolling; porosity; multilayer tapes; powder materials; composite materials.

В настоящее время интенсивно разрабатываются новые материалы и технологии порошковой металлургии, учитывающие возрастающие требования к оборудованию, применяемому в различных отраслях промышленности [1–8].

Одним из наиболее перспективных материалов является *терморасширенный графит* (ТРГ), обладающий рядом уникальных свойств [9–11]. Для порошков ТРГ характерна протяженная зона структурного уплотнения, т.е. при обработке давлением они формуются в широком диапазоне плотностей. Развитая поверхность частиц порошков ТРГ позволяет применять его в качестве изделий различного функционального назначения: фильтры, уплотнительные прокладки, пористые электроды, адсорбционные элементы и т.д. Эти изделия находят широкое применение в машиностроении при изготовлении оборудования ответственного назначения, работающего в агрессивных средах, при высоких давлениях и температурах.

Одним из возможных способов получения пористых изделий из ТРГ является прокатка порошков [12, 13]. Эта технология позволяет получать тонкие заготовки с развитой поверхностью, отличающиеся изотропностью

свойств, а также обеспечивает высокую производительность процесса при сравнительно низкой энергоемкости и практически безотходном использовании материала. Прокатка является непрерывным процессом формования, что позволяет получать ленты требуемой длины и плотности. Однако следует учитывать, что при прокатке начало и конец лент обладают неравномерными толщиной и плотностью из-за неустановившегося процесса формования.

Экспериментальные исследования

Прокатку порошков проводили на двух специализированных станах: СПП-80 и СПП-250. Порошковые станы этих моделей различаются параметрами процесса прокатки: диаметр валков, жесткость рабочей клети и возможность регулирования скорости прокатки. При получении уплотнительных лент из порошков ТРГ использовали следующие технологические параметры прокатки: для стана СПП-80 — диаметр валков 80 мм, длина бочки валка 45 мм; для стана СПП-250 — диаметр валков 250 мм, длина бочки валка 40 мм. Скорость прокатки в обоих случаях варьировали в интервале 0,0021...0,03 м/с, диапазон зазоров — 0...1,35 мм.

В качестве начальных критериев удовлетворительности свойств получаемых лент выбраны: сплошность, низкая разнотолщинность по длине и ширине ленты, отсутствие расслоений, отсутствие пузырей воздуха.

За счет развитой поверхности частиц порошок ТРГ обеспечивает схватывание между слоями. Для предотвращения налипания ТРГ на валки (из-за высокой адгезии) прокатку осуществляли в обкладках. В качестве материалов обкладки исследовали: алюминий, медь, никель, кальку, ватман, картон и их комбинации.

На начальном этапе исследования было установлено, что ватман наилучшим образом удовлетворяет требованиям технологического процесса. У этого материала обкладок отсутствует адгезия к валкам, он является дешевым, недефицитным, обладает существенно меньшей деформацией по сравнению с ТРГ. При использовании других материалов наблюдали адгезию ТРГ к поверхности обкладок, а также наклеп алюминиевых и медных обкладок.

Прокатка. На втором этапе исследования оценивали влияние режимов прокатки на обкладки из ватмана. При прокатке ватмана на стане СПП-80 уширение и удлинение полосы отсутствуют. Уплотнение полосы ватмана происходит неравномерно и не зависит от давления. Начиная с определенного зазора между валками, ватман сначала практически не уплотняется, в некоторый момент происходит скачок толщины (от 0,22...0,19 до 0,15 мм), далее при уменьшении зазора между валками возможен разрыв полосы ватмана вдоль и поперек волокон.

При прокатке полос ватмана на стане СПП-250 резкого скачка толщины при уплотнении не происходит, что связано с различной жесткостью станов. Стан СПП-80 намного жестче стана СПП-250. Однако при больших обжатиях прокатка полос ватмана заканчивалась разрывом полосы.

Важным этапом исследования являлся анализ влияния скорости прокатки и зазора между валками на выходные параметры однослойных лент из ТРГ. При минимальной скорости прокатки и максимальном зазоре между валками плотность получаемых лент 0,16...0,18 г/см³; при средних входных параметрах наблюдали увеличение плотности (от 0,25 до 0,29 г/см³). При максимальной скорости прокатки и минимальном

зазоре между валками плотность выходящих лент составила 0,36...0,47 г/см³.

Исследование показало, что прокатку порошка ТРГ следует проводить при малых скоростях, поскольку порошок, обладая низкой насыпной плотностью, плохо поступает в зону деформации и под действием выходящего воздуха поднимается.

При больших скоростях прокатки наблюдается резкое уменьшение толщины и плотности ленты, а также нарушается ее сплошность. Скорость прокатки можно увеличивать только при обкатке готовой ленты.

На основании экспериментов были выявлены параметры прокатки, позволяющие получить ленты с различными значениями плотности материала и толщиной изделия и разработать технологию изготовления лент различной геометрии (рис. 1).

Разработана также технология прокатки многослойных лент толщиной более 2 мм и плотностью более 0,3 г/см³. Однослойные и многослойные ленты можно получать следующими способами:

1. Получение однослойных лент (рис. 2, а).
2. Получение многослойных лент:
 - 2.1) совместная прокатка двух однослойных лент;
 - 2.2) совместная прокатка однослойной ленты со слоями порошка, засыпанного с двух сторон (рис. 2, б);

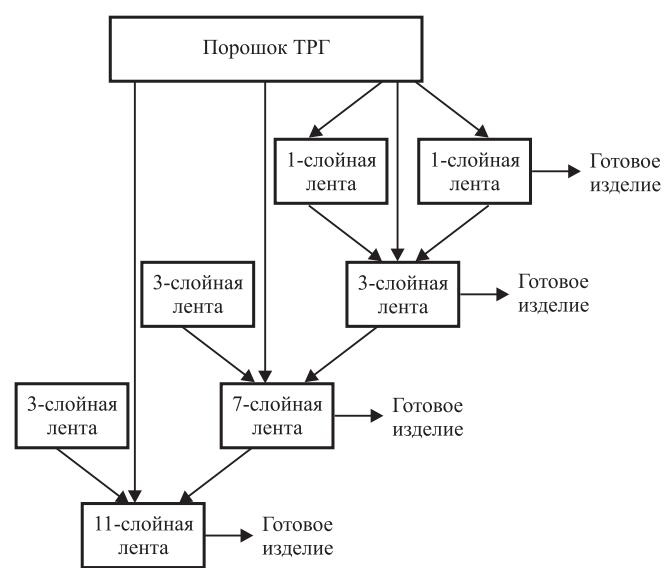


Рис. 1. Схема технологического процесса изготовления лент из порошков терморасширенного графита

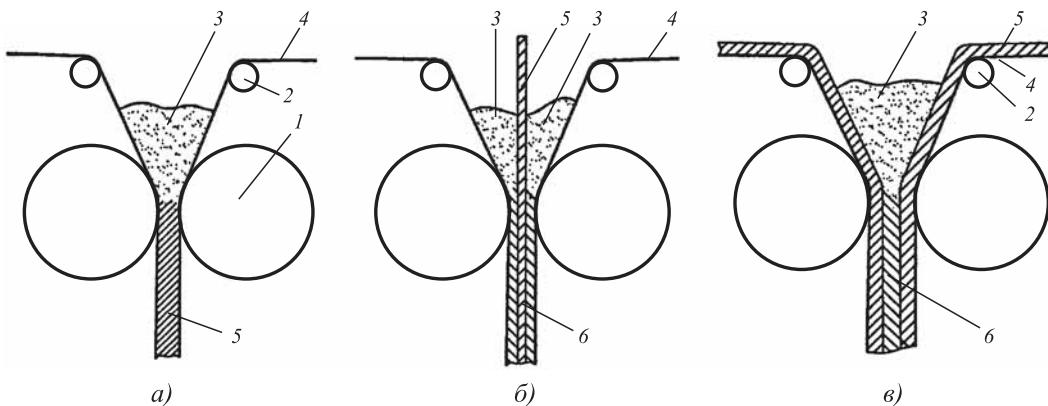


Рис. 2. Схема прокатки лент из порошков терморасширенного графита:

а — прокатка однослойной ленты; *б, в* — прокатка многослойной ленты; 1 — валки; 2 — направляющие; 3 — порошок терморасширенного графита; 4 — обкладки; 5 — однослойная лента; 6 — многослойная лента

2.3) совместная прокатка двух однослойных лент с порошком между ними (рис. 2, *в*).

Следует отметить, что однослойные ленты, получаемые способом 1, очень тонкие и не транспортабельные.

При совместной прокатке двух однослойных лент способом 2.1 многослойные ленты имеют большое количество пузырей воздуха, расслаиваются, так как между слоями слабое схватывание. Для удаления пузырей воздуха из лент можно провести повторную прокатку без изменения зазора между валками.

Ленты удовлетворительного качества с высокими прочностными свойствами получены способами 2.2 и 2.3, причем пузырей и расслоений в них не наблюдали, разнотолщина — небольшая.

Прокатку на стане СПП-250 проводили при одной и той же скорости, при изменении зазора между валками от 0,6 до 0 мм. Плотность получаемых многослойных лент изменялась в интервале 0,6...1,45 г/см³ при нулевом зазоре. После прокатки видимых следов разрушения ватмана не наблюдали. Происходило изменение текстуры внешней поверхности лент: она становилась более гладкой, что связано с увеличением плотности ленты после прокатки. Лента из порошка ТРГ получалась сплошной с минимальным разбросом значений высоты по ее длине. Адгезии порошка ТРГ к поверхности обкладок практически нет (только при поджатии валков наблюдали небольшую адгезию).

При прокатке на стане СПП-80 плотность лент составляет от 0,14 г/см³ при зазоре вал-

ков 1,35 мм до 0,35 г/см³ при зазоре 0,30 мм. Адгезия порошка ТРГ к поверхности обкладок несколько больше, чем при прокатке на стане СПП-250. Зависимость плотности ленты из ТРГ от зазора имеет линейный характер (рис. 3).

При прочих равных условиях на стане СПП-80 ленты получены более плотными, так как стан обладает большей жесткостью клети. Кроме того, они обладают большей прочностью и гибкостью.

При проведении исследований на обоих станах получены ленты, имеющие различную толщину и плотность (0,14...1,45 г/см³).

Установлено также существенное влияние на параметры лент свойств порошков ТРГ, т.е. способы окисления природных порошков графита и способы его термической обработки. Ленточные материалы из ТРГ, полученного по кислотной технологии, при прочих равных па-

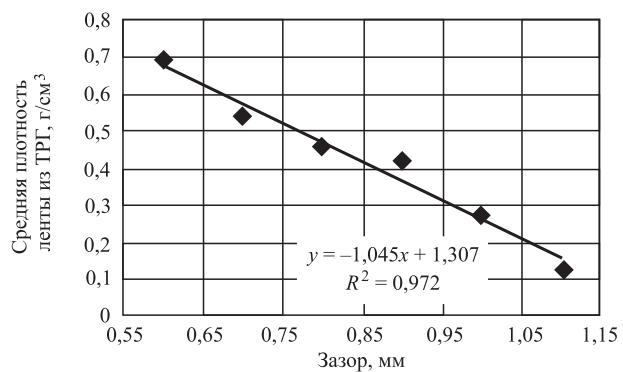


Рис. 3. Зависимость средней плотности ленты из порошков терморасширенного графита от зазора между валками

раметрах прокатки имеют меньшую толщину, большую гибкость и пониженную прочность по сравнению с лентами из ТРГ, полученного по фторной технологии.

На качество ленточных материалов также оказывает влияние способ расширения окисленных порошков графита. Ленты из порошка, полученного при расширении *интеркалированных соединений графита* (ИСГ) косвенным нагревом, имеют толщину 0,15...0,80 мм и плотность 0,45...1,15 г/см³. Ленты из порошка, полученного при расширении ИСГ плазмохимическим способом, при тех же параметрах прокатки значительно тоньше (0,13...0,6 мм), а плотность их меньше (0,35...1,0 г/см³). Кроме того, порошки ИСГ, которые расширены косвенным нагревом, имеют меньшую тенденцию к расследению и пузирению, чем полученные из графита, расширенного плазмохимическим методом.

Обобщая результаты экспериментов, можно заключить, что при постоянной скорости прокатки плотность (как выходной параметр) существенно изменяется в зависимости от зазора между валками. Предлагаемый способ изготовления лент позволяет получать изделия с пористостью 50...90 %.

В процессе прокатки исходная объемная слоисто-ячеистая масса порошка приобретает упакованную структуру. Частицы ТРГ проникают друг в друга, изменяют форму, растягиваются и плющатся под воздействием валков. После выхода из зоны деформации структура частиц более плоская, чем объемная. Уплотнение происходит вдоль оси прокатки, что приводит к появлению закрытой пористости. При деформации возникают сдвиг, кручение и механическое зацепление частиц порошка ТРГ.

Таким образом, варьирование свойствами порошков терморасширенного графита, режимами прокатки, количеством слоев в многослойных лентах, а также материалом обкладок позволяет получить ленточные материалы в широком диапазоне геометрических и физических параметров.

Прессование. Для получения изделий с лимитированной длиной и варьируемой шириной из порошков ТРГ используют метод прессования. Порошки ТРГ хорошо формуются при давлениях 0,05...400 МПа, при этом плотность получаемых изделий составляет 0,0016...0,85 г/см³. В настоящей работе для получения заготовок

из порошков ТРГ также был опробован метод прессования.

Структура частиц исходного порошка — слоисто-ячеистая с высокой внутренней пористостью и большим количеством спаек, что является благоприятным для процесса формования порошка. Микроструктура и характеристика пористости заготовок из порошка зависят от способа формования и существенно различаются при прессовании и прокатке.

Анализ микроструктуры образца, полученного прессованием порошка при давлении 0,023 МПа, показал, что частицы порошка не разрушены, хорошо видна их пластинчатая структура, между частицами присутствуют крупные поры, соизмеримые с размерами частиц (рис. 4, *a*).

*a)**b)*

Рис. 4. Микроструктуры образца, полученного при различных давлениях ($\times 50$):
a — 0,023 МПа; *б* — 0,232 МПа

В структуре образца, полученного при давлении 0,232 МПа, произошла переупаковка частиц при сохранении характера структуры, и уменьшился размер пор между частицами (рис. 4, б).

Исследование микроструктуры образцов показало, что при прессовании внутренние и внешние поры являются открытыми, что является положительной характеристикой для использования терморасширенного графита в качестве фильтра, а при высоких плотностях изделий — в качестве прокладок в узлах трения.

Заключение. Порошки терморасширенного графита хорошо формуются и уплотняются в широком диапазоне давлений при различных способах формования: прокатке и прессовании. Оба эти способа обработки порошков ТРГ в зависимости от технологических параметров процесса позволяют изготавливать высокопористые или высокоплотные изделия различного назначения, в том числе однослойные и многослойные ленты с необходимыми геометрическими и физическими характеристиками и заготовки лимитированных размеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава / А.И. Рудской, К.Н. Волков, С.Ю. Кондратьев, Ю.А. Соколов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 610 с.
2. Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A. et al. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // Acta Materialia. 2010. No. 58. P. 1887–1894.
3. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
4. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.

5. Biamino S., Penna A., Ackelid U. et al. Electron beam melting of Ti—48Al—2Cr—2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation // Intermetallics. 2011. No. 19. P. 776–781.

6. Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О. Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.

7. Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.

8. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.

9. Особенности строения и использования терморасширенного графита / А.М. Ханов, Л.Е. Макарова, А.И. Дегтярев, Д.В. Смирнов, О.Ю. Исаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2012. № 2. С. 92–106.

10. Celzard A., Mareche J.F., Furdin G. Modelling of exfoliated graphite // Progress in Materials Science. 2005. Vol. 50. Iss. 1. P. 93–179.

11. Thermally expanded graphite: Synthesis, properties, and prospects for use / A.V. Yakovlev, A.I. Finaenov, S.L. Zabud'kov, E.V. Yakovleva // Russian Journal of Applied Chemistry. 2006. Vol. 79. Iss. 11. P. 1741–1751.

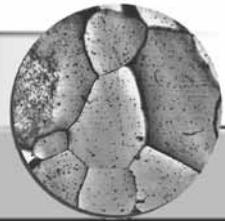
12. Исследование процессов получения высокопористых электродов из порошков терморасширенного графита / С.А. Котов, Л.П. Батурова, С.-В.Р. Музарова, Д.А. Сафонов // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2017): сб. трудов междунар. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 121–127.

13. Исследование процессов получения высокопористых электродов из порошков терморасширенного графита / С.А. Котов, С.-В.Р. Музарова, Д.А. Сафонов, Л.П. Батурова // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 132–140.

Сергей Анатольевич Котов, канд. техн. наук,
serkotov51@mail.ru;

Светлана-Виктория Рустамовна Музарова;
Мария Геннадьевна Ливинцова, канд. экон. наук





УДК 620.18

Ю.А. Лопатина, Р.Н. Задорожний

(Федеральный научный агронженерный центр ВИМ, г. Москва),

С.Д. Карпухин

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

Исследование формы и морфологии поверхности частиц порошков, полученных методом электроэрозионного диспергирования из отходов меди и сплавов на ее основе

Исследованы порошки, полученные из отходов меди М1, латуни ЛЦ38Мц2С2 и бронзы БрАЖ9-4 перспективным способом электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Форма и морфология частиц порошков изучены методом растровой электронной микроскопии. Также приведены значения удельной поверхности полученных порошков и распределения пор по размерам на поверхности исследуемых проб. Показано, что форма получаемых порошков преимущественно правильная (сферическая), сделаны выводы о механизмах формирования частиц в процессе ЭЭД.

Ключевые слова: электроэрозионное диспергирование; порошок; цветные сплавы; медь; латунь; бронза; вторичная переработка; растровая электронная микроскопия; удельная поверхность; распределение пор по размерам.

Powders obtained from copper and copper based alloys wastes by the promising method of electroerosion dispersion are analyzed. The study of the shape and morphology of the powder particles is carried out by scanning electron microscopy. The values of the specific surface area of the obtained powders and the distribution of pore sizes on the surface of the studied samples are also given. It is shown that the shape of the obtained powders is predominantly correct (spherical), conclusions are drawn about the mechanisms of particle formation in the process of electroerosion dispersion.

Keywords: electroerosion dispersion; powder; non-ferrous allous; copper; brass; bronze; waste recycling; scanning electron microscopy; specific surface area; pore size distribution.

Введение. С середины XX в. мировой спрос на цветные металлы увеличился в несколько сот раз. Обеспечение достаточным количеством материала, необходимым для удовлетворения будущей потребности общества, требует повышения уровня переработки отходов производства и отходов потребления цветных металлов. В настоящее время до 30 % от общего ресурса образующегося лома и отходов цветных металлов не подвергается последующей переработке [1, 2].

Таким образом, поиск и внедрение новых методов переработки отходов цветных металлов и сплавов, позволяющих осуществлять переработку в местах их образования, — одно из актуальных направлений исследований.

Перспективным способом переработки отходов цветных металлов и сплавов, позволяющим превращать лом в порошковые материалы, является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Широкое применение метода ЭЭД в производстве сдерживается отсутствием в научно-технической литературе достаточных сведений о закономерностях формирования порошковых материалов в процессе электроэрозионного диспергирования, их составе и свойствах.

Цель работы — исследование формы и морфологии порошков, производимых из отходов различных сплавов на основе меди, что позволит сделать вывод о пригодности данных

порошков к последующим процессам переработки.

Методика проведения исследований. Процесс ЭЭД представляет собой разрушение токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами. В зоне разряда под действием высоких температур происходит нагрев, расплавление и частичное испарение материала [3—6]. Для получения высокой температуры в ограниченной области малого объема необходима большая концентрация энергии, что достигается использованием импульсного напряжения, а также проведением процесса ЭЭД: в жидкой диэлектрической среде (рабочей жидкости), заполняющей зазор между электродами. Схема процесса представлена на рис. 1.

Электроэррозионному диспергированию были подвергнуты отходы меди М1, латуни ЛЦ38Мц2С2 и бронзы БрАЖ9-4. Химический состав исходных материалов приведен в табл. 1.

В процессе ЭЭД в качестве рабочей жидкости использовали: керосин для получения порошков меди, дистиллиированную воду для получения порошков латуни и бронзы. Параметры установки для ЭЭД: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 140...160 В; частота импульсов 172...174 Гц.

Форму и морфологию поверхности полученных порошков изучали с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA II в режиме детектирования вторичных электронов. Дополнительно исследовали пробы порошков на анализаторе удельной поверхности Autosorb-1, позволяющем определить суммарную площадь удельной поверхности исследуемого порошка и распределение пор по размерам на поверхности исследуемых частиц.

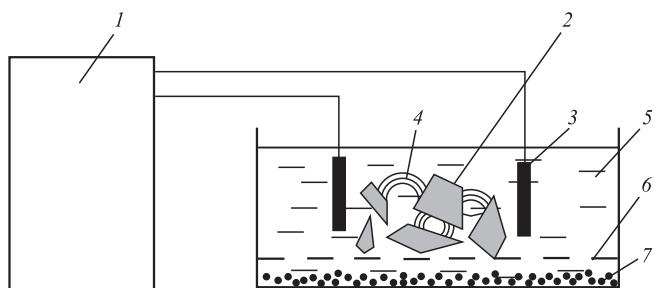


Рис. 1. Схема процесса электроэррозионного диспергирования:

1 — генератор импульсов; 2 — диспергируемый материал; 3 — электроды; 4 — каналы разряда; 5 — ванна с рабочей средой; 6 — полупроницаемая перегородка; 7 — порошок диспергируемого материала

Принцип действия анализатора основан на явлении адсорбции молекул газообразного адсорбата (в данном исследовании азота) активной поверхностью контрольного образца из газовой фазы над ним, в результате которой наблюдается изменение давления в ячейке с образцом. Зарегистрированное в виде графика изменение давления в ячейке с течением времени называется изотермами адсорбции-десорбции, которые в зависимости от протекающих на поверхности исследуемого образца процессов обладают различными характерными признаками; например, при наличии на поверхности образца пор данные кривые демонстрируют ярко выраженный гистерезис, связанный с капиллярной конденсацией газа в порах.

Использование знаний о закономерностях протекания происходящих на поверхности исследуемых порошков процессах позволяет проводить расчет площади активной поверхности образца методом Брунауэра—Эмметома—Теллера (B.E.T.) и расчет распределения пор по размерам методом Барретта—Джойнера—Халенды (B.J.H.). Данные расчеты являются достаточно

1. Химический состав исходных диспергируемых материалов, % мас.

Марка материала, ГОСТ	Cu	Zn	Mn	Pb	Al	Fe	Si	Ni	Sb	Sn	P
Медь М1 (ГОСТ 859—2014)	≥99,9	≤0,004	—	≤0,004	—	≤0,005	—		≤0,002		
Латунь ЛЦ38Мц2С2 (ГОСТ 17711—93)	57,0...60,0	32,8...40,0	1,5...2,5	1,5...2,5	≤0,8	≤0,8	≤0,4	≤1,0	≤0,1	≤0,5	≤0,05
Бронза БрАЖ9-4 (ГОСТ 18175—78)	84,3...90,0	≤1,0	≤0,5	≤0,01	8,0...10,0	2,0...4,0	≤0,1	—	—	≤0,1	≤0,01

сложными и трудоемкими и выполняются с помощью встроенного специализированного программного обеспечения прибора.

Результаты исследований и их обсуждение. Фотографии исследуемых проб порошков при увеличениях в 500 и 2000 раз показаны на рис. 2. Видно, что в пробах присутствуют ча-

стицы округлой и осколочной форм, однако, в общем объеме преобладают частицы окружных форм. Характер распределения порошков по формам от пробы к пробы не изменяется, что позволяет сделать вывод о действии одинаковых механизмов образования порошков из исходных заготовок в процессе ЭЭД в случае всех заготовок.

Известно [7–9], что в процессе электроэрозионного диспергирования образование частиц порошка может происходить путем протекания трех следующих процессов:

- 1) кристаллизация расплавленного материала (жидкой фазы), образующегося в канале разряда;

- 2) скальвание диспергируемого материала (твердой фазы) под действием ударных волн канала разряда;

- 3) кристаллизация кипящего материала (паровой фазы), также частично присутствующего в канале разряда.

Соответственно, в первом случае частицы порошка имеют окружную сферическую или эллиптическую форму, а во втором — неправильную осколочную форму, иногда с оплавленными гранями и краями. В исследуемых пробах наблюдаются частицы обеих форм, что позволяет сделать вывод о действии обоих описанных выше механизмов, однако, учитывая преобладание порошков окружных форм, очевидно, что большую роль в формировании частиц при диспергировании сплавов на основе меди играет механизм образования порошков из расплавленной (жидкой) фазы.

При увеличении в 20 000 раз (рис. 3) на поверхности порошков становятся различимы мелкие частицы разнообразных форм. Вероятнее всего, это частицы, образующиеся в результате действия 3-го механизма образования частиц при ЭЭД — кристаллизацией кипящего материала (паровой фазы). Видно, что данные частицы имеют

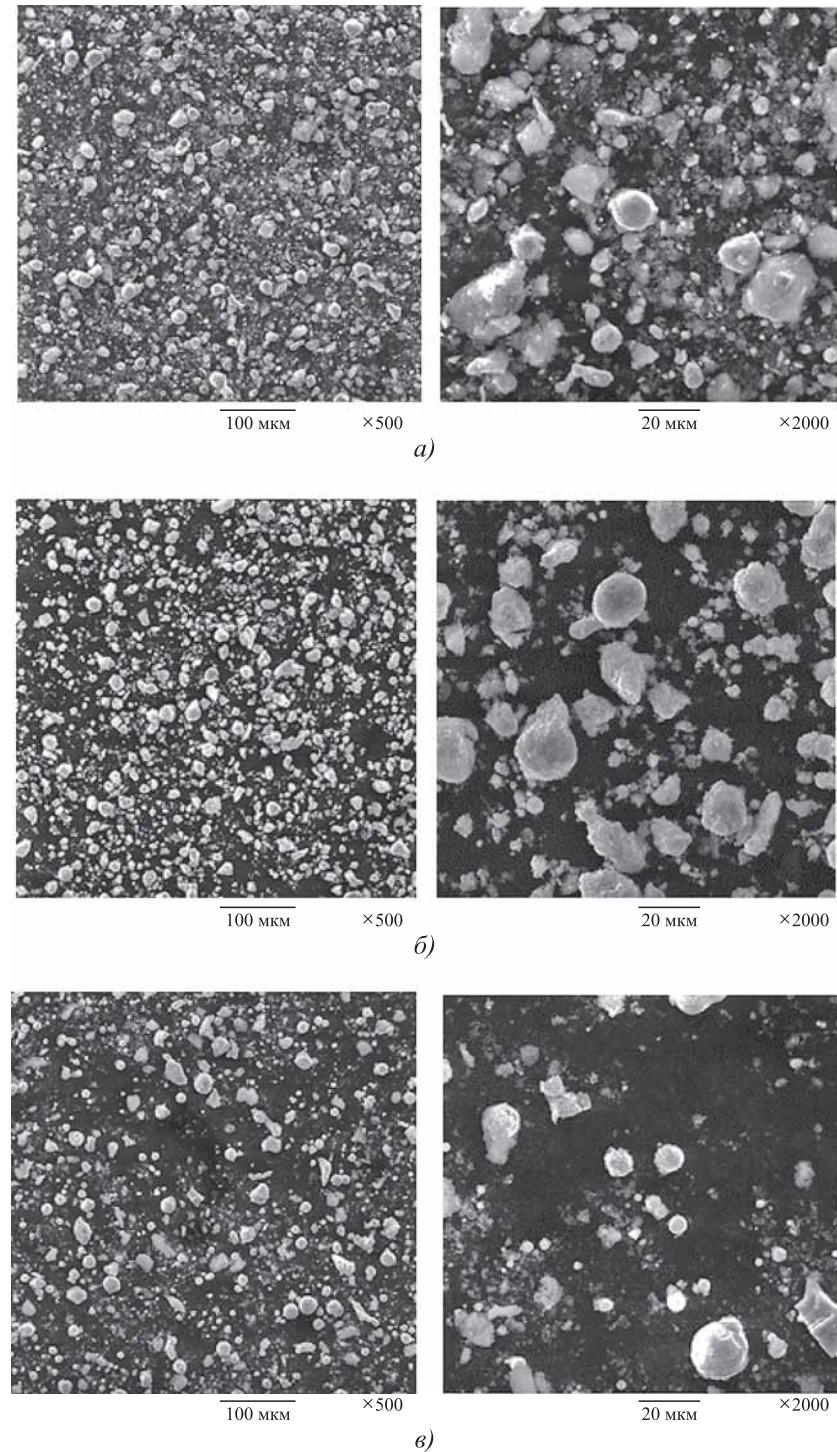
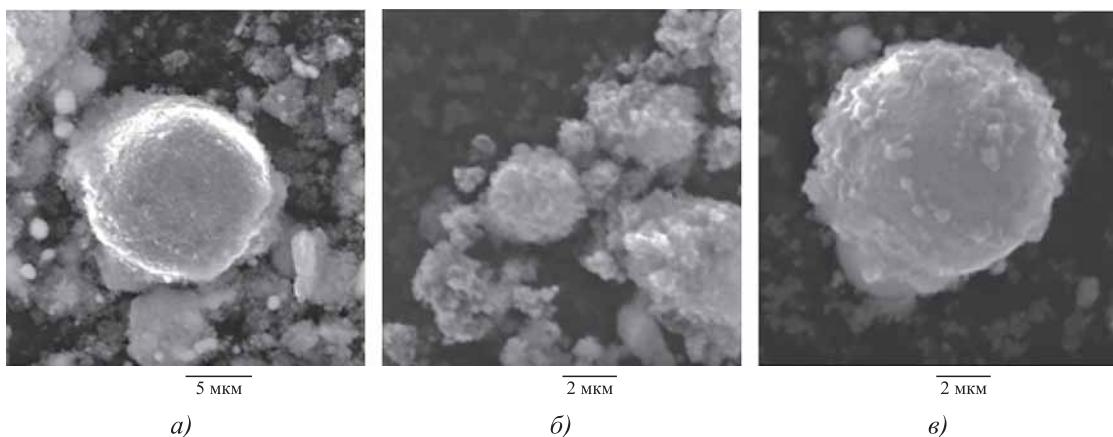


Рис. 2. Исследуемые пробы порошков при различных увеличениях:
а — медь М1; б — латунь Л38Мн2С2; в — бронза БрАЖ9-4



**Рис. 3. Частицы исследуемых порошков ($\times 20\,000$):
а — медь М1; б — латунь ЛЦ38Мн2С2; в — бронза БрАЖ9-4**

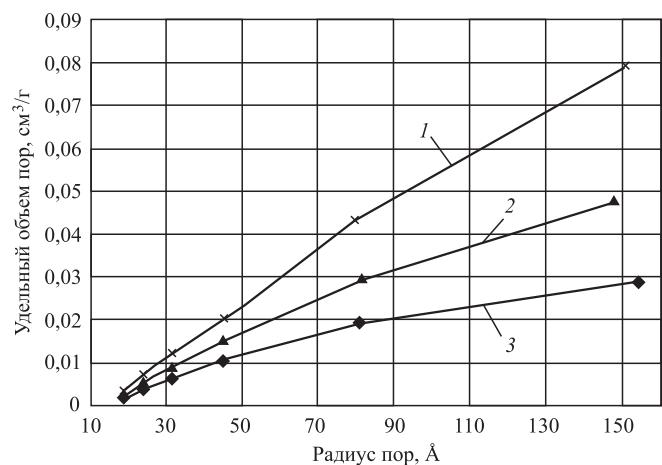
2. Результаты измерения удельной поверхности порошков

Параметр	Медь М1	Латунь ЛЦ38Мн2С2	Бронза БрАЖ9-4
Удельный объем поглощенного азота, $\text{см}^3/\text{г}$	54,7	33,72	19,84
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	31,58	22,80	13,25

неправильную форму и размер на несколько порядков меньше, чем частицы, образованные из жидкой и твердой фаз. Количество образуемых по данному механизму частиц очень велико — практически все крупные частицы порошка покрыты сеткой агломератов из данных более мелких частиц.

В табл. 2 представлены результаты измерения удельной поверхности проб порошков на анализаторе удельной поверхности Autosorb-1. Наиболее развитой поверхностью обладает порошок меди, что может быть вызвано двумя причинами: во-первых, большая площадь суммарной поверхности будет наблюдаться в том случае, если в составе пробы порошка преобладает наличие частиц порошка мелкой фракции; во-вторых, большая площадь поверхности может свидетельствовать о наличии на поверхности порошков большого количества пор и неровностей, в которые попадают частицы азота при исследовании.

Учитывая полученные данные о распределении пор по размерам на поверхности исследуемых образцов (рис. 4), можно сделать вывод, что, вероятно, причиной развитой поверхности порошка меди является примерно в 2 раза большее количество пор на поверхности ис-



**Рис. 4. Распределение пор по размерам на поверхности исследуемых проб порошков:
а — медь М1; б — латунь ЛЦ38Мн2С2; в — бронза БрАЖ9-4**

следуемой пробы меди, чем на поверхности порошка бронзы, для которой определенное значение удельной поверхности минимально. Все три исследуемых порошка, полученные методом ЭЭД из лома меди и сплавов на ее основе, обладают низкой пористостью и высокой удельной поверхностью.

Заключение. Установлено, что форма частиц, образующихся в процессе электроэрозионного диспергирования отходов сплавов на основе меди, не изменяется в зависимости от различий химического состава исходных диспергируемых материалов (легирование меди цинком, алюминием, железом и другими химическими элементами). Во всех случаях наблюдается образование частиц порошка преимущественно правильной, округлой формы, что позволяет сделать вывод о преобладающей

роли механизма образования частиц из расплава (жидкой фазы) материала. Также большую роль при образовании частиц в процессе ЭЭД играет механизм кристаллизации кипящего материала (паровой фазы), однако частицы, получаемые в результате протекания данного процесса, имеют размер на несколько порядков меньше, чем размер основной фракции порошков.

Форма частиц порошков и состояние их поверхности оказывают значительное влияние на такие параметры, как насыпная плотность порошков, прессуемость, сыпучесть и т.д. Порошки правильной сферической формы обладают максимальной насыпной плотностью и сыпучестью, но слабо прессуются; для получения качественных прессовок с достаточной прочностью из таких порошков необходимо приложение большого давления.

Высокая сыпучесть и плотная укладка являются определяющими факторами технологичности порошков при их использовании для аддитивных и наплавочных процессов, в связи с чем рекомендуется использовать порошки, полученные методом ЭЭД из отходов сплавов на основе меди, в качестве присадочных материалов в процессах восстановления поверхностей деталей различными методами напыления и наплавки, а также в процессах изготовления деталей методами 3D-печати (селективным лазерным сплавлением).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Insight** into physicomechanical and tribological properties of copper galvanic coatings formed with

the addition of electroerosion copper nanopowder / E.V. Ageeva, N.M. Horyakova, E.V. Ageev, R.A. Latypov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2017. Vol. 58. No. 2. P. 161–167.

2. **Хорыякова Н.М.** Разработка ресурсосберегающего способа получения порошковой меди электроэррозионным диспергированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2018. 24 с.

3. **А. с. 833377 СССР.** Способ получения металлического порошка / Л.П. Фоминский, Э.В. Горожанкин (СССР). Опубл. 1981, Бюл. № 20.

4. **А. с. 997988 СССР.** Способ и устройство для электроэррозионного диспергирования металлов / Л.П. Фоминский (СССР). Опубл. 1983, Бюл. № 7.

5. **А. с. 286716 А СССР.** Способ диспергирования электрическим разрядом токопроводящих материалов в жидкой среде / В.Н. Щепетов (СССР). Опубл. 1983, Бюл. № 10.

6. **А. с. 1470463 А1 СССР.** Способ электроэррозионного диспергирования металлов / Р.К. Байрамов и др. Опубл. 1989, Бюл. № 13.

7. **Задорожний Р.Н., Романов И.В., Шембереев И.А.** Исследование свойств металлических порошков, полученных из отходов твердых сплавов электроэррозионным диспергированием // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 208–213.

8. **Электроэррозионные** порошки микро- и нанометрических фракций для производства твердых сплавов / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, Г.Р. Латыпова // Электрометаллургия. 2016. № 1. С. 16–20.

9. **Рециклинг** отходов твердых сплавов для восстановления и упрочнения изделий / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, В.А. Денисов, Г.Р. Латыпова. Курск, 2017.

*Юлия Александровна Лопатина,
lopatina.julia@yandex.ru;*

*Роман Николаевич Задорожний, канд. техн. наук;
Сергей Дмитриевич Карпухин, канд. техн. наук*



ИНФОРМАЦИЯ

УДК 621.7-187

В.Л. Скрипка, Л.Х. Минязева

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

Особенности измерительных сигналов при фазохронометрической диагностике главного привода прокатного стана

Рассмотрены особенности формирования диагностических сигналов при использовании фазохронометрического метода измерений для оценки технического состояния главного привода экспериментального прокатного стана. Показана рациональность применения для технической диагностики главного привода прокатного стана модели неравномерности его вращения в виде модулированных колебаний элементарного осциллятора. Установлена возможность использования разности изменения периодов вращения элементов привода для выявления его потенциальных дефектов по степени деформации функции корреляций последовательности этих изменений.

Ключевые слова: фазы рабочего цикла; интервалы времени; фазохронометрический метод; измерительные сигналы; обработка результатов измерений; колебания; элементарный осциллятор; прокатный стан.

The features of the formation of diagnostic signals using the phase-chronometric measurement method to assess the technical condition of the main drive of the experimental rolling mill are considered. It is shown that rationality of application for the purpose of technical diagnostics of the main drive of rolling mill of the irregularity model of its rotation in the form of modulated oscillations of elementary oscillator. The possibility for using of the difference in the rotation periods of the drive elements to identify its potential defects by the deformation degree of the correlation function of the sequence of these changes is established.

Keywords: working cycle phases; time intervals; phase-chronometric method; measuring signals; measurement results processing; oscillations; elementary oscillator; rolling mill.

Высокая степень автоматизации, насыщенность механическим оборудованием приводят к изменению подходов к обеспечению эксплуатационной надежности прокатного оборудования. Требование необходимости безотказной работы комплекса металлургических машин не может быть решено традиционными методами периодических осмотров и диагностирования. Необходимо использование систем диагностирования с применением комплекса диагностических параметров. Оценка технического состояния металлургического оборудования, работающего на неопределенном стационарном нагружении, не может проводиться методами, используемыми для роторных машин, работающих в длительном режиме.

Необходимость постоянного контроля оборудования прокатных станов обосновывается скоростью развития повреждения при наиболее неблагоприятном стечении обстоя-

тельств — ошибок эксплуатации и приложений внештатных технологических нагрузок.

Анализ традиционных методов диагностики прокатных станов, включая вибродиагностику, позволил выявить следующие причины отсутствия эффективного информационно-метрологического сопровождения эксплуатации машин и механизмов:

- амплитудные методы получения информации (например, вибродиагностика) не в полной мере обеспечивают решение задач оценки текущего технического состояния и перехода от системы планово-предупредительной системы ремонтов к системе ремонтов по текущему техническому состоянию;
- метрологический уровень применяемых для диагностики средств измерений — средний или низкий;
- измерение уровня вибрации (вибродиагностика) механизмов позволяет получить

в основном статистические характеристики, а именно текущих значений параметров; применяемые системы мониторинга предусматривают автоматическое реагирование при достижении пороговых значений.

Традиционное решение контроля вибрационных параметров механизмов роторного типа, работающих в длительном режиме при постоянных нагрузках, заключается в наблюдении за постоянством вибрационных параметров. Механическое оборудование прокатных станов работает в нестационарных скоростных режимах и при непостоянной силовой нагрузке, обусловленной различием в технологических режимах прокатки. Поэтому принципы контроля технического состояния металлургических машин должны отличаться наблюдением за изменением скорости нарастания параметров. Следовательно, диагностическая система постоянного контроля должна быть ориентирована на возможность предупреждения быстроразвивающихся повреждений и позволять диагностировать развитие повреждений [1–3].

Распознавание неисправностей с использованием спектрального анализа (вибродиагностика) затрудняется неоднозначностью проявления неисправностей при различных частотах вращения и при различных нагрузках. Изменение нагрузки на двигатель также изменяет вид спектрограмм. Стационарная система, работая в режиме накопления информации, может определить зависимости между входными воздействиями и выходными реакциями, что необходимо предусмотреть в алгоритме функционирования [4, 5].

Нелинейные зависимости, наличие зон нестабильности и стабилизации позволяют утверждать, что в механическом оборудовании наряду с детерминированными процессами присутствуют и стохастические. Стабильность вероятностных характеристик последних определяется техническим состоянием системы. Амплитуда составляющих диагностируемых параметров и стабильность их значений могут быть связаны с изменением скоростного режима или технического состояния составных частей оборудования [6].

Стратегия эксплуатации современных технических систем и ответственных объектов базируется на определенном объеме информации об их фактическом состоянии, необходимом для принятия решения о проведе-

нии профилактических, восстановительных, регулировочных и других работ по обеспечению требуемых показателей (эффективности). В настоящее время получаемую измерительную информацию для указанных целей, в основном, используют для: прогнозирования технического состояния объекта; назначения упреждающих допусков на обобщенные параметры; получения оценок результатов эксплуатации объекта по назначению. При этом большое влияние на достоверность выводов о фактическом состоянии диагностируемого объекта оказывает "качество" результатов измерения [7].

Из структуры формирования диагностирующего параметра недостаточна только точность контрольно-измерительных процессов, а необходима также соответствующая эквивалентность порождающих и интерпретационных моделей этих процессов [8, 9]. Поэтому при получении контрольно-измерительной информации для диагностирования целесообразно максимизировать не только (и не столько) точность измерения, а формировать интерпретационные модели, которые основаны на учете взаимосвязей между различными компонентами полученных значений оцениваемых параметров.

Для эффективного решения проблемы оценки текущего технического состояния клетей прокатных станов предложено применение фазохронометрического метода, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана [10, 11]. Повышение качества измерительной диагностической информации в этом случае возможно благодаря переходу от амплитудной к хронометрической шкале и средствам ее реализации при относительных погрешностях $5 \cdot 10^{-4} \%$ на промышленной частоте.

В данном методе используются прецизионно измеренные временные интервалы, соответствующие интервалам фаз рабочего цикла, зависящим от характерных особенностей движения элементов механизма. Цикличность движения механизма и минимальный разброс результатов измерений при осуществлении рабочего цикла позволяют выявить стабильные во времени диагностические признаки и индивидуальные количественные значения параметров, которые характеризуют техническое состояние прокатного стана. Особенности диагностики главного привода прокатного стана в фазохронометрическом представлении рассмотрены в работе [12].

Настоящее исследование посвящено формированию диагностических сигналов при использовании *фазохронометрического метода измерений (ФХМ)* для оценки технического состояния главного привода экспериментального прокатного стана [13–15].

Большинство измерительных задач, решаемых ФХМ, связаны с мониторингом характеристики плоского вращательного движения твердых тел вокруг оси. Исходя из основного закона динамики твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, запишем

$$M = \dot{\omega}J, \quad (1)$$

где M — главный момент внешних сил относительно оси вращения; ω — частота вращения; J — момент инерции тела относительно оси вращения.

Представим момент M как сумму момента M_p , необходимого для реализации рабочего движения наблюдаемого элемента, и его колебательной составляющей $M_T \sin(\omega t + \phi)$ или $M_T \cos(\omega t + \phi)$, характеристики которой являются основным источником измерительной информации при ФХМ (t — текущее время колебаний; ϕ — угол поворота вращающихся элементов ходовой части стана).

В установившемся режиме вращения вала момент можно рассматривать в "нулевом приближении" как колебания системы элементарного осциллятора, уравнение движения которого имеет вид

$$\ddot{\alpha} = \alpha_0 \sin(\omega t + \phi_0) \text{ или } \ddot{\alpha} = \alpha_0 \sin \phi, \quad (2)$$

где α — угол поворота вала; α_0 — амплитуда колебаний элементарного осциллятора; ϕ_0 — начальная фаза колебаний (или поворота) вала в момент начала отсчета времени при $t = 0$; $\phi = \omega t + \phi_0$.

Появление изменений характеристик колебаний (в том числе и изменение фазы), которые статистически отличимы от таких же характеристик при стационарном режиме работы, свидетельствуют о появлении возмущений движения осциллятора, вызванных появлением дефектов.

Рассмотрим уравнение свободного движения элементарного осциллятора, параметры которого с течением времени изменяются

$$\ddot{\alpha} + \alpha \omega^2 = 0 \quad (3)$$

при условиях $\alpha = \alpha(t)$, $\omega = \omega(t)$, $d\phi/dt = \dot{\omega}$.

При этом коэффициент $\omega(t)$ изменяется медленно, поэтому в каждый небольшой промежуток времени колебания осциллятора будут почти гармоническими и, следовательно, решение уравнения (3) имеет вид (2), однако $\alpha_0 = \alpha_0(t)$ и $\omega = \omega(t)$. Из условий к (3) получаем, что $\alpha = \int_0^t \omega(t) dt$ (нижний предел этого интеграла несущественен).

Предположим, что не только ω , но и $\dot{\omega}$ изменяются медленно, поэтому α и $\ddot{\alpha}$ будут также изменяться медленно. Тогда на основании (3) получим

$$\ddot{\alpha}_0 \sin \phi + 2\dot{\alpha}_0 \omega \cos \phi + \alpha_0 \ddot{\omega} \cos \phi = 0.$$

Учитывая, что первый член последнего уравнения имеет высший порядок малости по сравнению со вторым, то второй и третий члены должны друг друга скомпенсировать или

$$2 \frac{d\alpha}{dt} \omega + \alpha \frac{d\omega}{dt} = 0; \quad 2 \frac{d\alpha}{\alpha} + \frac{d\omega}{\omega} = 0,$$

или после интегрирования $2 \ln \alpha + \ln \omega = \text{const}$, тогда $\alpha^2 \omega = \text{const}$.

Вследствие пренебрежения членом высшего порядка малости выражение $\alpha^2 \omega$ не постоянно, а изменяется с течением времени, но относительная скорость его изменения имеет высший порядок малости по сравнению с относительной скоростью изменения частоты вращения. Таким образом, измеряя степень изменения величины "инварианта" — $\alpha^2 \omega$, можно судить об обнаружении дефектов типа постепенного износа или увеличения сопротивления движению. При этом достоверность соответствующих выводов будет во многом определяться формированием статистически независимых значений периода T , которые служат в ФХМ основным источником первичной информации. Вместе с тем предположение об одновременном медленном изменении ω и $\dot{\omega}$ может не выполняться. В частности, при наличии достаточно резких возмущений внешних воздействий или (и) медленном, но нелинейном изменении ω будет наблюдаться неустойчивость колебаний осциллятора.

Рассмотрим в качестве примера нелинейный осциллятор, описываемый уравнением

$$\ddot{\alpha} + \omega^2 (1 + k\alpha^2) \alpha = \varepsilon F(t), \quad (4)$$

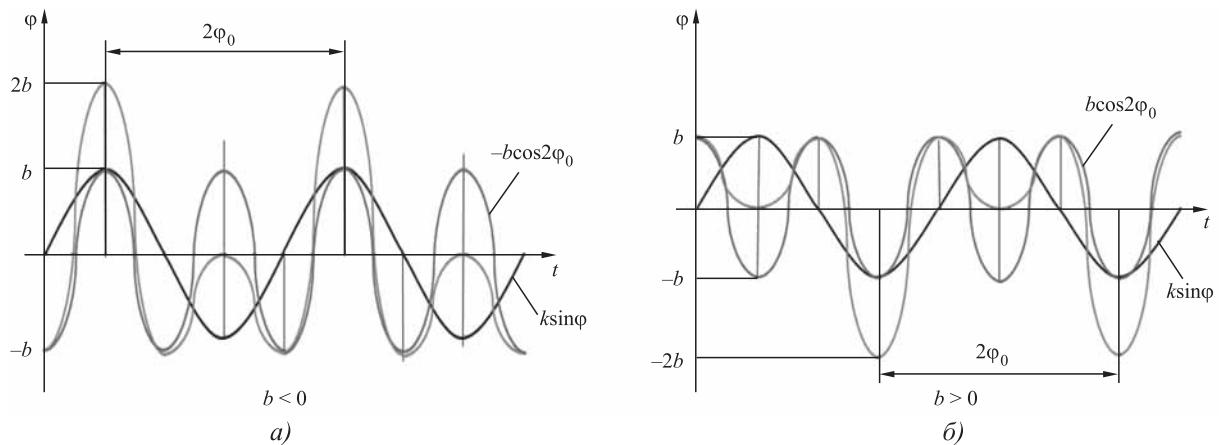


Рис. 1. Теоретическая огибающая колебаний при соотношениях:
а — $b/k = 1$, $b < 0$; б — $b/k = 1$, $b > 0$

где k — амплитуда колебаний осциллятора по синусоиде; $F(t)$ — сила в виде толчков, дляящихся малое время и следующих периодически с периодом T ; $k\alpha^2$ — слабая нелинейность; ε — достаточно большие возмущения.

В [16] показано, что согласно (4) даже грубая оценка изменения фаз колебаний в двух последовательных периодах может отличаться следующим образом:

$$\frac{\delta\varphi_{n+1}}{\delta\varphi_n} \approx \frac{b \cos 2\varphi_n}{R}, \quad (5)$$

где φ_n , φ_{n+1} — фаза осциллятора n -го и $(n+1)$ оборотов; b — амплитуда колебаний осциллятора по косинусоиде; R — корреляционная функция.

Из выражения (5) следует, что в зависимости от знака $\cos 2\varphi_n$ амплитуда колебаний будет возрастать или затухать во времени, кратном $\frac{2\pi}{\omega}$, обратно пропорциональ-

но степени корреляции соседних фаз и может свидетельствовать о тенденции развития того или иного диагностируемого процесса.

Во многом схожий результат получается при отсутствии внешних воздействий на рассматриваемый вариант колебательной системы,

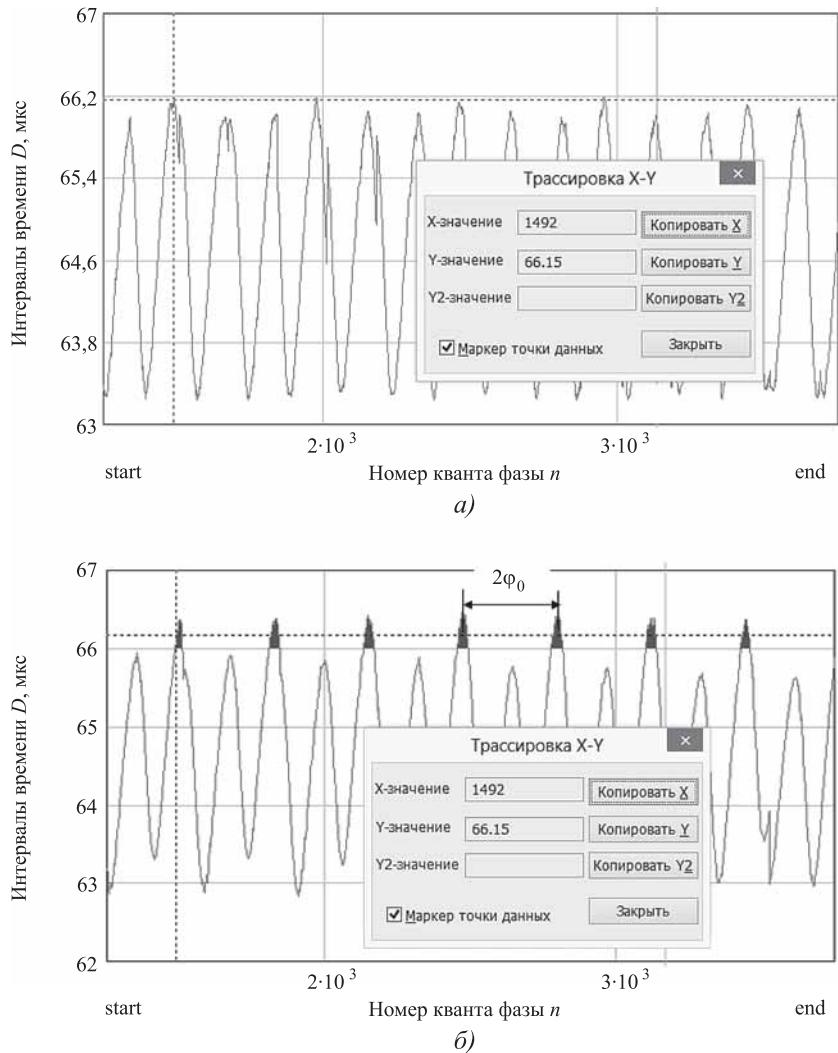


Рис. 2. Экспериментальная хронограмма вращения элементов главного привода прокатного стана на холостом ходу:
а — без дефекта редуктора; б — при развитии трещины червяка редуктора

но и при наличии дополнительных гармонических составляющих, вызывающих нелинейность колебаний. Например, движение осциллятора описывается выражением

$$\ddot{\alpha} + (\omega_0 + k \sin pt)^2 \alpha = 0, \quad (6)$$

где ω_0 — постоянная составляющая колебаний; $k \sin pt$ — модулирующее колебание, обусловленное изменением момента сопротивления движению; p — частота модуляции; $|k| \ll \omega_0$,

$p = \omega_0$ [17]. В этом случае при $p \geq 2\phi_0$ амплитуда колебаний будет возрастать или затухать во времени в зависимости от знака $\cos 2\phi_0$, где $2\phi_0$ — периодическое изменение характеристик осциллятора, вызывающих параметрический резонанс для случая $b/k = 1$ (рис. 1).

Представленные выше теоретические данные находят экспериментальное подтверждение. На рис. 2 и 3 приведены экспериментально полученные хронограммы вращения элементов главного привода прокатного стана на холостом ходу и в процессе прокатки соответственно.

Из приведенных хронограмм следует, что при появлении дефекта на частотах, кратных 2ϕ , появляются ярко выраженные выбросы, которые могут использоваться в качестве диагностирующего признака. Следует отметить, что при появлении дефекта (наличия указанных выбросов) червяк редуктора вышел из строя, что вызвало необходимость замены всего редуктора.

Структуру фазохронометрических оценок можно применять для довольно широкого класса циклически работающих механических систем и обеспечивать выигрыш, который дает использование таких структур по сравнению со схемами независимой оценки параметров сигнала на каждом периоде повторения. Учитывая, что на практике часто приходится сталкиваться с ситуациями, в которых оценки характеристик измеряемого циклического процесса на соседних периодах повторения сильно коррелированы, применение моделей квазилинейных колебательных структур диагностических сигналов для целей мониторинга фактического состояния механических систем на основе ФХМ целесообразно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров В.А., Ошовская Е.В. Особенности проявления и выявления поломок металлургических машин // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. 2000. Вип. 5. С. 14—19.

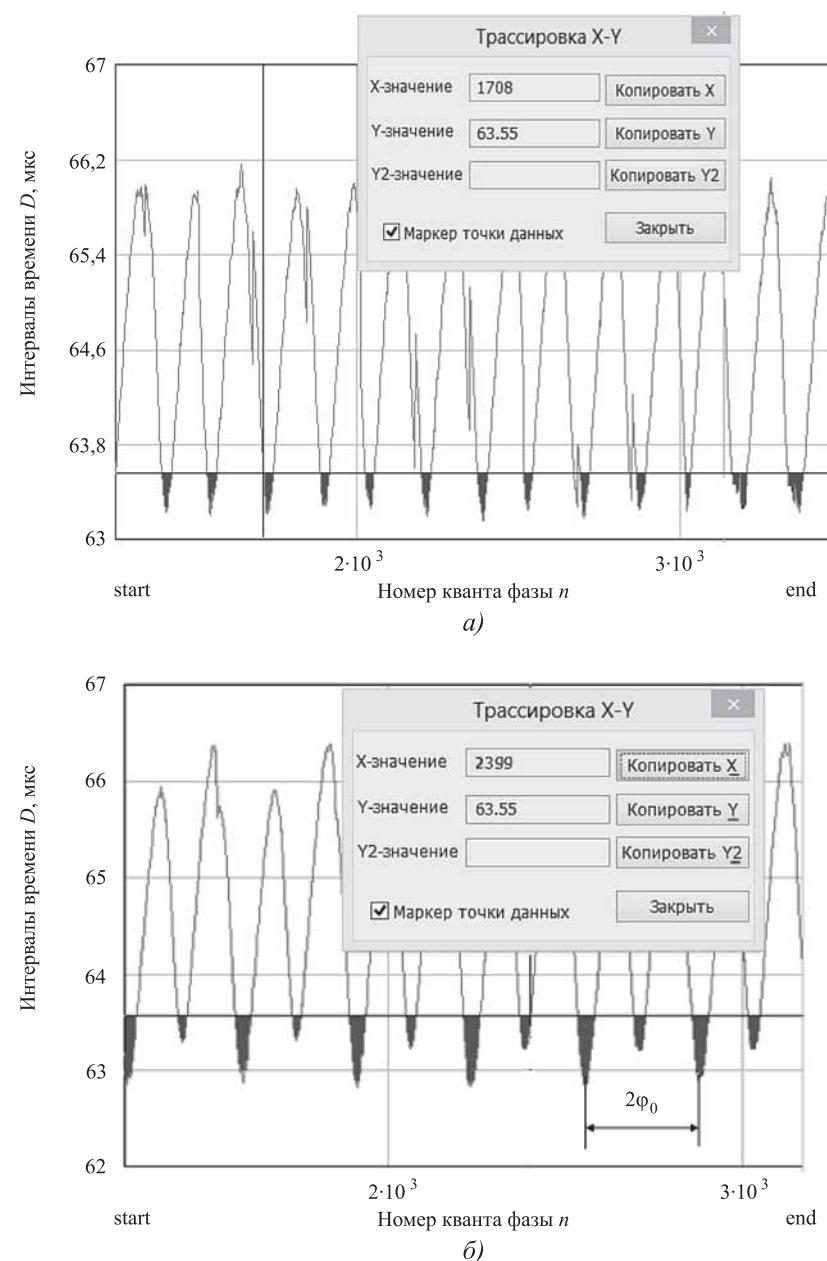


Рис. 3. Экспериментальная хронограмма вращения элементов главного привода прокатного стана в процессе прокатки:

а — без дефекта редуктора; б — при развитии трещины червяка редуктора

2. **Диагностирование** механического оборудования металлургических предприятий / В.Я. Седуш, В.М. Кравченко, В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская. Донецк: ООО "Юго-Восток, Лтд", 2004. 100 с.
3. **Вибродиагностика** в системах технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования металлургических производств / А.Е. Сушко, М.А. Демин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2005. № 1 С. 6—9.
4. **Радчик И.И., Рябков В.М., Сушко А.Е.** Комплексный подход к вопросам надежности работы основного и вспомогательного оборудования современного металлургического производства // Оборудование. Технический альманах. 2006. № 1. С. 24—28.
5. **Кравченко В.М., Сидоров В.А., Седуш В.Я.** Техническое диагностирование механического оборудования: учебник. Донецк: ООО "ЮгоВосток, Лтд", 2009. 459 с.
6. **Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю.** Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. 169 с.
7. **Сычев Е.И., Томилёв Ю.Ф., Храменков В.М.** Планирование метрологического обеспечения технических систем. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1988. 288 с.
8. **Титов В.Ю., Скрипка В.Л.** Достоверность интерпретации акустических характеристик ультразвуковых преобразователей при оценке геометрических параметров объекта контроля // Метрология. 2014. № 6. С. 22—27.
9. **Земельман М.А.** Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991. 228 с.
10. **Киселев М.И., Пронякин В.И.** Проблема точности при метрологическом обеспечении производства и эксплуатации машин и механизмов // Проблемы машиноведения: точность, трение и износ, надежность, перспективные технологии / под ред. В.П. Булатова. СПб.: Наука, 2005. С. 7—24.
11. **Киселев М.И., Пронякин В.И.** Прецизионный фазовый контроль функционирующих циклических машин и механизмов хронометрическим методом и его приложения // Фундаментальные проблемы и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем ("Фридлендеровские чтения"): тр. пятой сессии междунар. научной школы: СПб.: ИПМ, 2002. С. 55—60.
12. **Шинкаревич Ю.П., Минязева Л.Х.** Применение фазохронометрического метода для оценки технического состояния прокатного оборудования // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. № 9. С. 409—415.
13. **Киселев М.И., Пронякин В.И.** Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 18—19.
14. **Пронякин В.И., Тумакова Е.В.** Методы и средства измерений, испытаний и эксплуатации изделий авиакосмической техники // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 11. С. 30—36.
15. **Кудрявцев Е.А., Лось Л.А., Пронякин В.И.** Состояние и проблемы мониторинга технического состояния насосных агрегатов // Автоматизация в промышленности. 2017. № 10. С. 45—49.
16. **Заславский Г.М.** Статистическая не обратимость в нелинейных системах. М.: Наука, 1970. 144 с.
17. **Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д.** Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1967. 646 с.

Виталий Леонидович Скрипка, канд. техн. наук,
vit-skipcka@yandex.ru;
Луиза Халисовна Минязева



**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 621.74

В.Ю. Лавриненко, К.А. Батышев, К.Г. Семенов

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

Международная научно-техническая конференция "Иновационные технологии в литейном производстве" в МГТУ имени Н.Э. Баумана

22–23 апреля 2019 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана состоялась Международная научно-техническая конференция "Иновационные технологии в литейном производстве", посвященная 150-летию факультета "Машиностроительные технологии" и кафедры "Технологии обработки материалов". Организатор конференции — кафедра "Технологии обработки материалов", имеющая большой исторический опыт и научно-технологический задел в области исследований и разработки современных технологий литейного производства.

В работе конференции приняли участие более 100 ученых и специалистов из российских вузов (Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Московский авиационный институт, Московский политехнический университет, Самарский государственный технический университет, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева, Тихоокеанский государственный университет, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Сибирский государственный университет, Сибирский федеральный университет, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина и др.), а также из других стран.

С приветствиями в адрес участников конференции выступили Г.Л. Зеркалов — ведущий научный сотрудник Стэнфордского университета (США) и д-р техн. наук, профессор В.Д. Рябичев — ректор Луганского национального университета им. Владимира Даля.

В своем обращении к участникам конференции руководитель Научно-учебного комплекса "Машиностроительные технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана д-р техн. наук, профессор А.Г. Колесников отметил, что литей-

ное производство является одной из основных баз машиностроительной отрасли промышленности и использование современных методов литья позволяет получать детали с минимальными припусками на обработку и высокими механическими и эксплуатационными свойствами, что на современном этапе является исключительно важным аспектом любого производства.

Работа конференции затронула многие важные направления литейного производства: получение отливок из алюминиевых и легких сплавов; производство отливок из тяжелых цветных металлов и сплавов; производство отливок из стали и чугуна; моделирование литейных процессов, аддитивные технологии и САПР; переработка, утилизация и вторичное использование сплавов и отходов литейного производства, а также современные методики образования в области литейного производства.

С докладом "Современные направления развития литейного производства" выступил президент Российской ассоциации литейщиков д-р техн. наук, профессор И.А. Дибров.

С докладом на тему "Современные формоочечные материалы и противопригарные покрытия" выступил заслуженный деятель науки и техники, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН И.Е. Илларионов (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова).

Многие доклады были посвящены получению высококачественных отливок из современных алюминиевых сплавов, например, доклад д-ра техн. наук, профессора Н.А. Белова (Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС") на тему: "Принципы легирования наноструктурных алюминиевых сплавов, выплавляемых на основе вторичного (баночного) сырья".

Доклад на интересную тему, актуальную для многих литейных цехов предприятий и

посвященную получению современных экологически чистых литейных смесей на основе технических лигнинов, сделал профессор Ю.А. Свинороев из Луганского национального университета им. Владимира Даля.

Также были представлены доклады: канд. техн. наук А.В. Чайкина (ООО "Металлург", г. Сафоново) "Совершенствование технологического процесса плавки сталей в печах с кислой футеровкой", д-ра техн. наук, профессора В.А. Изотова (Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева) "Получение ответственных отливок из алюминиевых сплавов для авиа двигателестроения с помощью гибридной (литейно-аддитивной) технологии", д-ра техн. наук, профессора А.И. Малярова (Московский политехнический университет) "Эффективность инновационных технологий в литейном производстве Российской Федерации", канд. техн. наук А.Б. Семенова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) "Технологии производства точных заготовок и деталей машин из структурированных многофазных материалов (металлургия тиксотропных материалов)", профессора Владислава Станчека (Институт технологии и материалов Словацкого технического университета, г. Братислава) и д-ра техн. наук, профессора А.И. Батышева (Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС") "Механические свойства и микроструктура отливок из алюминиевого сплава AlSi7Mg0,3", д-ра техн. наук, профессора К.А. Батышева, канд. техн. наук, доцента К.Г. Семенова и канд. техн. наук, доцента В.В. Чернова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) "Иновационные низколегированные сплавы на основе меди для производства фасонного литья" и др.

Все доклады участников были опубликованы в сборнике трудов конференции.

Конференция завершилась круглым столом, на котором были рассмотрены проблемы и пути решения современного преподавания дисциплин по литейному производству. Активными участниками дискуссии по данному вопросу выступили д-р техн. наук, профессор А.И. Батышев (Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"), д-р техн. наук, доцент Р.В. Гаварiev (Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ), генеральный дирек-

тор завода алюминиевых сплавов (г. Подольск) А.Г. Цыденов и руководитель секции литья кафедры "Технологии обработки материалов" МГТУ им. Н.Э. Баумана Е.Д. Демьянов.

По результатам работы конференции были приняты следующие решения:

1. Отметить важное научное и практическое значение конференции "Иновационные технологии в литейном производстве" для специалистов вузов, промышленных предприятий, отраслевых институтов и исследовательских университетов, а также актуальность направлений исследований и технологий, проводимых в МГТУ им. Н.Э. Баумана и других вузах и организациях, для развития литейного производства в России.

2. Отметить перспективность и важность взаимовыгодного сотрудничества МГТУ им. Н.Э. Баумана с вузами, научно-исследовательскими институтами, промышленными предприятиями, направленного на разработку инновационных технологий в литейном производстве.

3. Одобрить инициативу кафедры "Технологии обработки материалов" и факультета "Машиностроительные технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана по проведению данной конференции и выразить признательность руководству факультета за ее организацию.

4. Отметить большую работу организационного комитета по подготовке и проведению конференции.

5. Рекомендовать лучшие доклады, представленные на конференции, к публикации в научно-технических журналах "Литейное производство", "Металлургия машиностроения", "Литейщик России", "Заготовительные производства в машиностроении" и "Вторичные металлы".

6. Считать целесообразным проведение Международной научно-технической конференции "Иновационные технологии в литейном производстве" в МГТУ им. Н.Э. Баумана на регулярной основе один раз в два года.

7. Расширить состав участников и тематику конференции приглашением ведущих специалистов промышленных предприятий России и других стран.

*Владислав Юрьевич Лавриненко, д-р техн. наук,
vlavrinenko@bmstu.ru;*

*Константин Александрович Батышев, д-р техн. наук;
Константин Геннадьевич Семенов, канд. техн. наук*



Weldex—2019

19-я Международная выставка сварочных
материалов, оборудования и технологий

15—18 октября 2019 г., Москва

Место проведения: Конгрессно-выставочный центр "Сокольники"

Тематики выставки:

- Оборудование и материалы для сварки
- Оборудование для резки металла
- Промышленные роботы
- Оборудование и материалы для нанесения защитных и упрочняющих покрытий
- Оборудование для контроля качества сварных соединений
- Инструменты и приспособления для сварочных работ
- Средства индивидуальной и коллективной защиты при проведении сварочных работ
- Оборудование для обработки кромок
- Технические газы
- Оборудование для приварки крепежа
- Оборудование для сварки полимерных материалов

По данным www.weldex.ru

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 10.06.2019. Подписано в печать 25.07.2019. 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.