

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

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

**Зам. главного
редактора**
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОБЕРНИК Н.В., д.т.н., доц.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., д.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.
ЛАВРИНЕНКО Ю.А., д.т.н., доц.
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.
НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПЛОХИХ А.И., к.т.н., доц.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ОЛУНД Э., Dr. Ir.
ТУТМАН Т., Dr. Yur.

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

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

За содержание рекламных
материалов ответственность
несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

- Александров Н.Н.,** Гуцин Н.С., Нуралиев Н.Ф. Особенности изготовления мелющих элементов для углеразмольных мельниц из высокотехнологичного износостойкого хромоникелевого чугуна 51
- Мальнев А.Д., Глуховской С.В., Михеев Р.С.** Применение процесса фрикционной наплавки для изготовления сталеалюминиевых функционально-градиентных слоистых композиций 55

Кузнечно-штамповочное производство

- Панфилов Г.В., Нгуен Ван Тинь.** Способы изготовления трехслойных уплотнителей с наружными металлическими и центральным эластичным слоями 61

Прокатно-волочильное производство

- Котенок В.И., Кузнецов С.А., Берестнев С.А., Тугушев П.Н.** Трехвалковый резьбо-накатной стан-автомат СХПРС 20-50 для осевой накатки резьбы заданной длины 67

Материаловедение и новые материалы

- Путырский С.В., Плохих А.И., Яковлев А.Л.** Исследование условий деформации многослойного материала методом конечно-элементного моделирования 74
- Золотов А.М., Смирнов М.О., Чижик Т.А.** Исследование механизма износа контактных поверхностей рабочих лопаток паровой турбины из титанового сплава BT6 81

Информация

- Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Михайловский И.А., Смирнов А.В.** Расчетное определение параметров модели кулоновского трения посредством моделирования процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника автомобиля 90

**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 технологии 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
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee

BLANTER M.S.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOBERNIK N.V.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOTENOK V.I.
KOSHELEV O.S.
KRUK A.T.
KUKHAR' V.D.
LAVRINENKO Yu.A.
LARIN S.N.
MONASTYRSKY V.P.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NURALIEV F.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PLOKHICH A.I.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
TREGUBOV V.I.
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
Rossii" 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

- Aleksandrov N.N.**, Gushchin N.S., Nuraliev N.F. Manufacture features of grinding elements for coal mills made of high-tech wear-resistant chromium-nickel cast iron51
- Mal'nev A.D.**, Glukhovskoy S.V., Mikheev R.S. Application of friction surfacing process for production of steel-aluminum functional gradient layered compositions55

Forging and Stamping Production

- Panfilov G.V.**, Nguyen Van Tinh. Methods for producing of outer metal and central elastic layers three-layer seals61

Rolling and Drawing Production

- Kotenok V.I.**, Kuznetsov S.A., Berestnev S.A., Tugushev P.N. Three-roller thread-rolling machine-automator SKhPRS 20-50 for axial rolling of given length thread67

Physical Metallurgy and New Materials

- Putyrsky S.V.**, Plokhikh A.I., Yakovlev A.L. Study of multilayer material deformation conditions by method of finite element analysis74
- Zolotov A.M.**, Smirnov M.O., Chizhik T.A. Study of wear mechanism of contact surfaces of steam turbine blades made of titanium VT6 alloy81

Information

- Gun I.G.**, Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Mikhaylovsky I.A., Smirnov A.V. Calculated determination of parameters for Coulomb friction model by simulation of axial joint pressing process90

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"*



УДК 621.74.0026

DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-2-51-54

Н.Н. Александров, Н.С. Гущин (АО "НПО "ЦНИИТМАШ", г. Москва),
Н.Ф. Нуралиев (Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Особенности изготовления мелющих элементов для углеразмольных мельниц из высокотехнологичного износостойкого хромоникелевого чугуна

Разработан новый высокотехнологичный хромоникелевый чугун с шаровидным графитом с улучшенными характеристиками в литом состоянии. Показаны технологические преимущества нового сплава в сравнении с зарубежным чугуном типа "Нихард-4". По разработанной технологии изготовлены высококачественные отливки мелющих элементов из нового отечественного износостойкого чугуна в условиях российских заводов. Среднеходные углеразмольные мельницы, оснащенные этими мелющими элементами, успешно прошли эксплуатационную проверку на отечественных и зарубежных ТЭЦ. Показаны технико-экономические преимущества новой технологии по сравнению с зарубежной, что позволило гарантировать стабильное изготовление в условиях российских заводов высококачественных износостойких массивных отливок сложной конфигурации из отечественных материалов.

Ключевые слова: чугун; карбиды; шаровидный графит; кремний; хром; ванадий; аустенит; микроструктура; мартенсит; твердость; отливки; мелющие элементы; бандаж; сегмент; бронеплита; мельница; технологические свойства.

New high-tech spheroidal graphite chromium-nickel cast iron with improved as-cast properties is developed. The technological advantages of the new alloy are shown in comparison with foreign cast iron of the type Nihard-4. High-quality castings of grinding elements made of new domestic wear-resistant cast iron are made in the conditions of Russian plants using the developed technology. Medium-speed coal grinding mills equipped with these grinding elements have successfully passed the operational test at domestic and foreign thermal power plants. The technical and economic advantages of the new technology in comparison with foreign ones are shown, which made it possible to guarantee the stable production of high-quality wear-resistant massive castings of complex configuration using domestic materials under the conditions of Russian plants.

Keywords: cast iron; carbides; nodular graphite; silicon; chromium; vanadium; austenite; microstructure; martensite; hardness; castings; grinding elements; bandage; segment; armor plate; mill; technological properties.

Разработка новых конструкционных чугунов с высокими параметрами специальных свойств (износостойкость) необходима для увеличения выпуска электроэнергии в результате значительного наращивания мощности энергоблоков тепловых электростанций, работающих на угле.

Производительность лучших среднеходных углеразмольных мельниц немецкой фирмы Deutsche Babcock — до 90 т/ч, срок службы мелющих элементов достигает 12 тыс. ч на Экибастузском высокозольном угле (Казахстан), с удельным расходом металла 12...29 г/т. В то

время когда была приобретена лицензия фирмы Deutsche Babcock, лучшие отечественные среднеходные мельницы типа МВС, оснащенные коническими бандажами из износостойкого чугуна с 13 % Cr и 3 % Mn, имели срок службы 5...7 тыс. ч при производительности 25...30 т/ч угольной пыли.

Производство лицензионной среднеходной углеразмольной мельницы МПС-2650 производительностью 90 т/ч было освоено в АО "Тяжмаш" (г. Сызрань). Масса мелющих элементов этой мельницы (рис. 1),

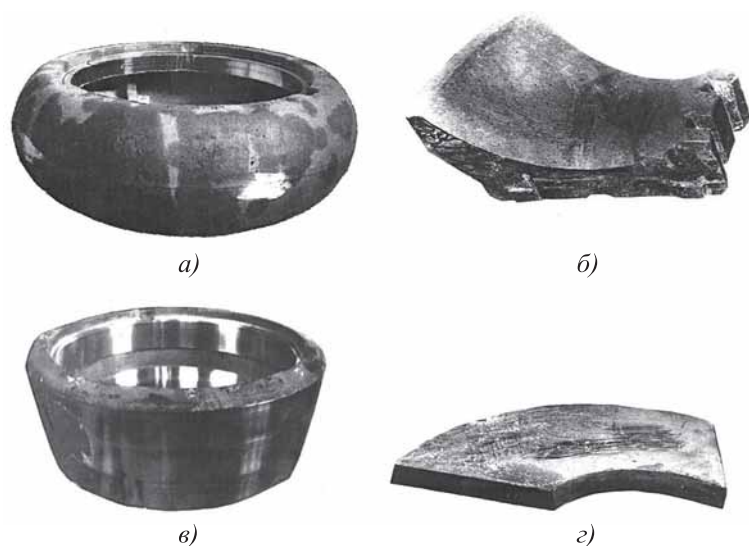


Рис. 1. Мелющие элементы углеразмольных мельниц:
a — тороидальный бандаж, 6 т; *б* — сегмент размольной чаши, 0,8 т; *в* — конический бандаж, 3 т; *г* — бронеплита, 0,6 т

которые отливали в сталелитейном цехе ООО "Белэнергомаш-БЗЭМ" (г. Белгород), составила для отливок тороидального бандажа и сегмента размольной чаши соответственно 6,0 и 0,8 т (см. таблицу). Немецкая фирма изготавливает их из белого чугуна типа "Нихард-4", разработанного фирмой International Nickel Company (США) и получившего широкое применение за рубежом.

Однако этот материал, как показали исследования, нетехнологичен и требует строгого соблюдения сложного технологического процесса производства таких массивных изделий, как тороидальные бандажи. При их изготовлении необходимо применение чистых шихтовых материалов, а для

форм — специальных хромистых песков. Литая металлическая основа чугуна типа "Нихард-4" является аустенитной, а карбидная фаза состоит из карбидов цементитного $(Fe, Cr)_3C$ и тригонального типа $(Cr, Fe)_7C_3$ (рис. 2, *a*). Такая структура имеет низкую теплопроводность, вследствие чего чугун с такой структурой склонен к образованию трещин. Немецкая фирма рекомендует отливки из этого чугуна извлекать из формы при температуре ниже 110 °С, что удлиняет продолжительность технологического процесса. Отливка бандажа массой 6 т должна охлаждаться в форме 25 суток.

После термической обработки структура металлической основы зарубежного чугуна состоит из мартенсита и остаточного аустенита (до 5 %) и карбидов цементитного и тригонального типа (рис. 2, *б*).

Первая опытно-промышленная партия отливок мелющих элементов лицензионной мельницы МПС-2650, изготовленная из белого чугуна типа "Нихард-4" в условиях Белгородского завода, показала, что брак отливок тороидальных

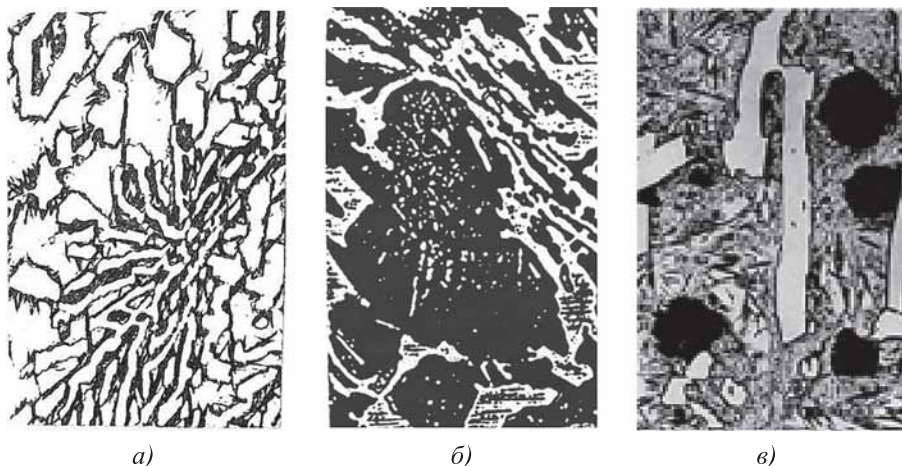


Рис. 2. Микроструктуры чугуна типа "Нихард-4" в различных состояниях (×500):
a — литое; *б* — термообработанное (травлено); *в* — литое, чугун ЧХ8Н4ФС

Конструктивные параметры износостойких отливок валковых углеразмольных мельниц МПС-2650 и МВС

Отливка	Диаметр, мм		Толщина, мм	Высота, мм	Масса, т
	наружный	внутренний			
Бандаж:					
тороидальный	2060	1820	120...250	700	6
конический	1520	1310	190...210	480	3
Сегмент	865 (длина)	860 (ширина)	90...180	395	0,8
Бронеплита	626	385	110	110	0,6

бандажей по трещинам достигал 25 или 90 % от общего брака литья.

В связи с этим перед специалистами ЦНИИТМАШ была поставлена задача: разработать отечественный износостойкий сплав с улучшенными технологическими характеристиками и технологию изготовления отливок мелющих элементов, которая в большей степени отвечает заводским условиям, чем зарубежная.

В результате комплекса работ был разработан новый хромоникелевый чугун ЧХ8Н4Ш [1], литая структура которого являлась в основном мартенситно-карбидной с небольшим содержанием остаточного аустенита (до 10 %) и включений шаровидного графита в количестве 0,5...1,5 % (см. рис. 2, в). Такое гетерогенное строение структуры, получаемое по разработанной технологии с соответствующим модифицированием, обеспечивает высокую износостойкость и хорошие физико-механические свойства деталей. Изделия из чугуна ЧХ8Н4Ш в литом состоянии (без термической обработки) имеют твердость 58...62 HRC, соответствующую ТУ для деталей углеразмольного оборудования.

На основании экспериментальных данных можно гарантировать изготовление крупнотоннажных отливок из чугуна ЧХ8Н4Ш, обладающего в литом состоянии благоприятным сочетанием специальных свойств, с низким уровнем остаточных напряжений и, соответственно, без трещин, что убедительно подтвердило их производство в условиях Белгородского завода.

По разработанной ЦНИИТМАШ технологии из половинчатого чугуна ЧХ8Н4Ш была отлита опытно-промышленная партия (примерно 300 т) высококачественных отливок тороидальных бандажей и сегментов размольного стола, после механической обработки в АО "Тяжмаш" они были установлены на лицензионные среднеходные углеразмольные мельницы МПС-2650.

Эксплуатационную проверку работоспособности этих мельниц проводили на отечественных и зарубежных ТЭЦ.

Эффективность работы углеразмольных мельниц зависит от различных факторов, в частности от зольности угля. Чем она выше, тем быстрее изнашиваются мелющие элементы мельниц. Срок службы мелющих элементов мельниц МПС-2650 из чугуна ЧХ8Н4Ш, эксплуатируемых на Чайковской ТЭЦ, работающей на низкозольных углях (6...30 %), составил 13,0...13,5 тыс. ч, а на Экибастузской ТЭЦ (Казахстан), работающей на высокозольных углях (15...82 %), — 11,0...12,5 тыс. ч.

Опыт внедрения разработанной ЦНИИТМАШ новой технологии изготовления отливок мелющих элементов из чугуна ЧХ8Н4Ш в условиях Белгородского завода вместо зарубежной технологии из белого чугуна типа "Нихард-4" показал следующие технико-экономические преимущества:

- снижение температуры перегрева жидкого чугуна на 90...100 °С;
- сокращение времени подготовки расплава для заливки форм на 1,0...3,5 ч в зависимости от массы выплавленного чугуна;
- не требуется проведение высокотемпературной обработки;
- снижение брака литья по трещинам на 90...95 %;
- сокращение продолжительности охлаждения отливок в опочной оснастке в 3—6 раз в зависимости от массы отливки.

Сокращение продолжительности охлаждения в литейной форме отливок из нового чугуна ЧХ8Н4Ш по сравнению с отливками из белого чугуна типа "Нихард-4" связано с различным механизмом получения мартенситно-карбидной металлической основы. В частности, зарубежный чугун для замены литой аустенитной металлической основы подвергают нормализации по режиму: выдержка в течение 8 ч при температуре 810 °С с последующим охлаждением на воздухе.

В процессе термической обработки происходит следующее. Во-первых, при выдержке в металлической основе чугуна выделяются вторичные мелкодисперсные карбиды из пересыщенного первородного аустенита, что снижает в нем концентрацию углерода и хрома, вследствие чего превращение аустенита перемещается из области низких (0...80 °С) в область высоких (500...800 °С) температур. Во-вторых, в процессе охлаждения чугуна на воздухе в интервале температур 800...500 °С происходит превращение аустенита в мартенсит.

При кристаллизации и затвердевании чугуна ЧХ8Н4Ш в его металлической основе выделяется часть структурно-свободного углерода в виде шаровидного графита, что также способствует обеднению аустенита углеродом. Благодаря этому повышается температура начала мартенситного превращения и при охлаждении на воздухе в интервале 800...500 °С происходит трансформация аустенита в мартенсит, а также создаются необходимые условия для формирования в металлической основе карбидов только тригонального типа.

Таким образом, изготовление износостойких отливок по зарубежной технологии происходит в два этапа. Первоначально их отливают, а за-

тем подвергают высокотемпературной термической обработке. По разработанной технологии ЦНИИТМАШ эти два этапа совмещены в один, т.е. после заливки расплава в литейную форму отливку извлекают из нее при температуре ниже 800 °С. В процессе охлаждения на воздухе до температуры окружающей среды происходит трансформация аустенита в мартенсит, а требуемые эксплуатационные свойства износостойких отливок из чугуна ЧХ8Н4Ш достигаются в литом состоянии, т.е. необходимость применения высокотемпературной обработки отпадает.

В работе [2] показано, что за счет дополнительного ввода ванадия в чугун ЧХ8Н4ФШ, который распределяется в карбидах в большей степени, чем в металлической основе, концентрация хрома в карбидах тригонального типа снижается, а в металлической основе, наоборот, увеличивается, что значительно повышает термодинамическую активность углерода и хрома. Благодаря этому снижается критическое содержание хрома, необходимое для инициирования полной инверсии карбидной фазы, т.е. образование тригональных карбидов вместо карбидов цементитного типа, микротвердость которых в 1,5 раза меньше, чем у первых карбидов.

Благодаря повышенному содержанию кремния в разработанном сплаве в его металлической основе частично выделяется структурно свободный углерод в виде шаровидного графита, что существенно улучшает его технологические свойства в литом состоянии:

- повышается на 40...50 % жидкотекучесть;
- снижается на 50...60 % коэффициент линейного расширения в интервале температур 20...100 °С;
- увеличивается на 8...10 % теплопроводность;
- повышается предел прочности при изгибе на 40...50 %;
- уменьшается склонность к появлению литейных напряжений;
- снижается склонность к образованию микро- и макротрещин;
- увеличивается прокаливаемость.

ООО "Литейный завод "Петрозаводскмаш" получил заказ на изготовление мелющих элементов для китайской среднеходной углеразмольной мельницы производительностью 45 т угольной пыли/ч. Масса мелющих элементов (см. рис. 1) этой мельницы составила для

конического бандажа и бронеплиты соответственно 3,0 и 0,6 т (см. таблицу).

Специалистами ЦНИИТМАШ была разработана технология изготовления мелющих элементов для китайской мельницы из чугуна ЧХ8Н4ФШ с шаровидным графитом [3] применительно к условиям ООО "Литейный завод "Петрозаводскмаш".

После изготовления 450 т износостойких отливок и принятия ОТК завода бандажи и бронеплиты были отправлены в АО "Тяжмаш" для прохождения механической обработки. После заключительной приемки ОТК мелющие элементы были отправлены в Китай. Продолжительность работы мелющих элементов в условиях китайских ТЭЦ составила 10...12 тыс. ч.

Таким образом, разработка отечественного износостойкого высоколегированного хромоникелевого чугуна с шаровидным графитом, обладающего лучшими технологическими свойствами в сравнении с зарубежным белым чугуном типа "Нихард-4", позволила гарантировать стабильное изготовление в условиях российских заводов из отечественных материалов износостойких массивных отливок сложной конфигурации, по эксплуатационным свойствам не уступающих, а в ряде случаев и превосходящих свойства отливок из зарубежного чугуна.

Современные технологии, разработанные сотрудниками ЦНИИТМАШ на основе нового класса износостойких чугунов (ЧХ8Н4Ш и ЧХ8Н4ФШ), позволили значительно уменьшить себестоимость (в 2—3 раза) изготовления высококачественных износостойких отливок, что повышает их конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 1299155 SU. Износостойкий чугун.
2. Особенности инверсии карбидной фазы половинчатого хромоникелевого чугуна / В.В. Андреев, А.А. Тахиров, Н.С. Гушин, Ф.А. Нуралиев // Литейное производство. 2018. № 4. С. 2—6.
3. Пат. 2234553 RU. Износостойкий чугун. Оpubл. 14.08.2004, Бюл. № 23.

Николай Никитьевич Александров, д-р техн. наук;
Николай Сафонович Гушин, канд. техн. наук,
 mr.nikolay.51@mail.ru;
Нурлан Фейзуллаевич Нуралиев

А.Д. Мальнев, С.В. Глуховской, Р.С. Михеев
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Применение процесса фрикционной наплавки для изготовления сталеалюминиевых функционально-градиентных слоистых композиций

Рассмотрена возможность применения процесса фрикционной наплавки для изготовления сталеалюминиевых функционально-градиентных слоистых композиций триботехнического назначения. Показано влияние технологических параметров процесса фрикционной наплавки: частоты вращения стержня, продольной линейной скорости перемещения стержня и способа предварительной подготовки поверхности подложки на формирование наплавленного слоя.

Ключевые слова: фрикционная наплавка; алюмоматричные композиционные материалы; интерметаллиды; сталеалюминиевые композиции триботехнического назначения.

The possibility for applying of the friction surfacing process for the production of steel-aluminum functional gradient layered compositions for tribotechnical purposes is considered. The effect of technological parameters of the friction surfacing process: the rotation frequency of the rod, the longitudinal linear speed of the rod movement and the substrate surface preliminary preparation method on the formation of the deposited layer is shown.

Keywords: friction surfacing; aluminum-matrix composite materials; intermetallics; steel-aluminum compositions for tribotechnical purposes.

Введение. Потребность в новых материалах машин и механизмов, обладающих высоким уровнем функциональных характеристик, привлекает все большее внимание к разработке дисперсно-наполненных композиционных материалов (КМ) на основе алюминия и его сплавов [1, 2]. В то же время для обеспечения работоспособности в экстремальных условиях эксплуатации, характеризующихся воздействием факторов разной физико-химической природы, во многих случаях возникает необходимость в создании функционально-градиентных слоистых композиций (ФГСК) триботехнического назначения на базе конструкционных сталей с рабочими слоями из КМ [3, 4].

К настоящему времени номенклатура технологических процессов формирования ФГСК включает в себя твердофазные (например, прокатку пакетов из материала матрицы и КМ, сварку взрывом, диффузионную сварку, термомеханическую обработку поверхностного слоя КМ) и жидкофазные способы (например, инфильтрацию специально собранных порошковых каркасов переменного состава, центробежное литье, дуговую наплавку, модифицирующую обработку оплавлением), а также методы нанесения покрытий из газовой фазы [4]. Одна-

ко большинство из них являются относительно дорогими и трудоемкими.

Одним из наиболее предпочтительных подходов для решения этой задачи является применение простой и экономичной технологии фрикционной наплавки или наплавки трением [5–7]. Подобная технология сравнима с процессом сварки трением с перемешиванием, в котором вращающийся стержень, изготовленный из КМ, является расходуемым материалом, обеспечивающим формирование рабочего слоя на поверхности стальной подложки. Нагрев зоны соединения происходит в результате работы против сил трения, возникающих на соединяемых поверхностях при физическом контакте вращающегося стержня с подложкой, прижатых друг к другу нормальной силой. Достижимая в процессе фрикционной наплавки максимальная температура нагрева зоны соединения не превышает температуру плавления матричного алюминиевого сплава стержня из КМ [8]. Таким образом, на торце контактирующей с подложкой части стержня формируется вязкопластичный граничный слой, образующий наплавленное покрытие при поступательном движении стержня и подложки относительно друг друга.

Вследствие относительно низких температур нагрева процесс фрикционной наплавки в сравнении с другими методами изготовления ФГСК характеризуется узкой зоной термического влияния и ограниченным диффузионным взаимодействием на границе раздела подложка—покрытие. Последнее является особенно ценным при нанесении на стальные подложки покрытий из алюмоматричных КМ, поскольку позволяет предотвратить на границе раздела интенсивный рост хрупких интерметаллидных соединений разного стехиометрического состава системы Fe—Al, снижающих уровень адгезионной прочности ФГСК.

Цель работы — исследование возможности применения процесса фрикционной наплавки для получения ФГСК триботехнического назначения на базе конструкционных сталей с рабочими слоями из алюмоматричных КМ.

Материалы и методы исследования. В качестве подложки для нанесения покрытий применяли пластины размерами 100×200×3 мм, изготовленные из качественной низкоуглеродистой стали 20 (0,17...0,24 % мас. С; 0,17...0,37 % мас. Si; 0,35...0,65 % мас. Mn; ≤0,25 % мас. Cr; Fe — остальное по ГОСТ 1050).

Наличие или отсутствие высокомодульных, тугоплавких армирующих частиц не оказывает влияния на механизмы образования и роста интерметаллидной фазы на границе раздела сталь—алюминий. Поэтому в качестве на-

плавляемого материала использовали алюминий А5 (0,2...0,35 % мас. Fe; 0,1...0,25 % мас. Si; ≤0,015 % мас. Cu; Al — остальное по ГОСТ 7871) в форме стержня диаметром 18 мм.

Дополнительным критерием, определяющим выбор чистого алюминия в качестве материала покрытия, являлось исключение влияния легирующих элементов на механизм образования и характеристики диффузионной зоны границы раздела подложка—покрытие.

Для осуществления процесса фрикционной наплавки применяли экспериментальную установку, изготовленную на базе вертикально-фрезерного станка (рис. 1). Основные технологические параметры процесса фрикционной наплавки: давление p , частота вращения стержня n , а также продольная v_1 и поперечная v_2 линейные скорости перемещения стержня. Среди них наибольшее влияние на качество формирования наплавленного слоя оказывают частота вращения и скорость продольного перемещения стержня [9]. Поэтому процесс фрикционной наплавки проводили в широком диапазоне значений указанных параметров, выбранных согласно литературным данным [5—10]:

— частота вращения стержня n — от 1400 до 2160 мин⁻¹;

— продольная линейная скорость перемещения стержня v_1 — от 82 до 104 мм/мин.

Давление в зоне соединения составляло 10 МПа и оставалось постоянным во всех экс-

периментах. Фрикционной наплавкой наносили покрытия за один или несколько проходов. При формировании покрытий из нескольких валков коэффициент перекрытия соседних валков равен 0,5 ширины валика.

Дополнительно исследовали влияние способа предварительной подготовки поверхности подложки на возможность получения и особенности формирования наплавленного слоя. Для этого поверхность стальной подложки обрабатывали различными способами (табл. 1).

Проводили измерения и оценку геометрических размеров наплавленных покрытий.

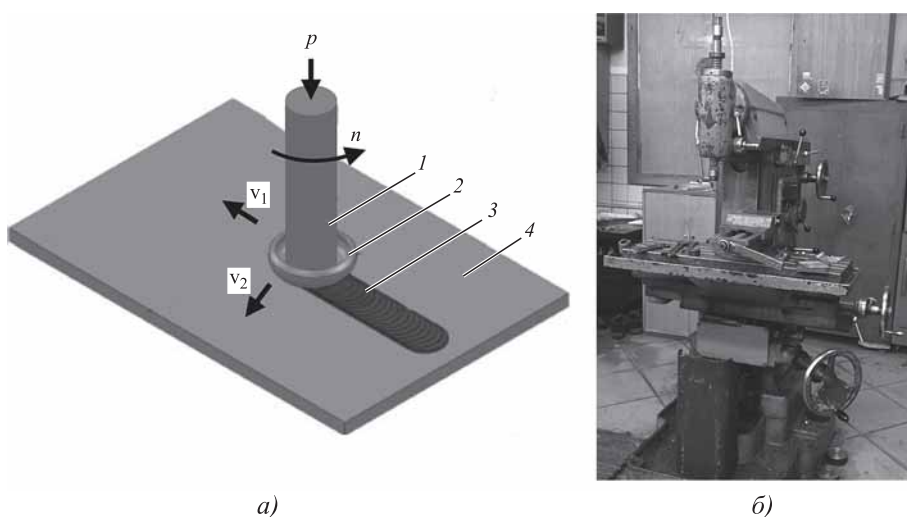


Рис. 1. Схема процесса фрикционной наплавки (а) и экспериментальная установка (б):

1 — стержень из КМ; 2 — вязкопластичный граничный слой; 3 — наплавленный слой; 4 — подложка; p — давление; n — частота вращения стержня; v_1 , v_2 — продольная и поперечная линейные скорости перемещения стержня соответственно

1. Способы подготовки поверхности стальной подложки

Способ подготовки	Особенности подготовки
Без подготовки	—
Механическая	Обработка поверхности стальной пластины углошлифовальной машинкой до придания ей металлического блеска
Химическая	Обработка поверхности стальной подложки водным раствором КОН для удаления органических загрязнений
Лужение	Нанесение на поверхность стальной подложки с помощью электрического паяльника слоя чистого олова толщиной не более 0,5 мм

Из изготовленных заготовок механическим путем вырезали образцы поперек направления наплавки для проведения металлографических исследований. Исследование структуры диффузионной зоны между подложкой и наплавленными покрытиями осуществляли средствами оптической и электронной микроскопии с применением светового микроскопа БИОМЕД, укомплектованного цифровой камерой, а также растрового электронного микроскопа Tescan VEGA II LMU, оснащенного приставкой для проведения рентгеноспектрального микроанализа.

Результаты и их обсуждение. Изготовленные образцы ФГСК характеризуются непрерывным наплавленным слоем из алюминия А5, толщина которого не превышает 2 мм (рис. 2).

Однако не все из опробованных технологических режимов процесса фрикционной наплавки позволяют получить наплавленный слой (табл. 2). В частности, наплавленный слой не сформировался при частоте вращения стержня

1400 мин⁻¹ и отсутствии предварительной подготовки поверхности стальной подложки (образец № 1, см. табл. 2). Причиной этого может быть не только неудовлетворительное качество подготовки поверхности подложки, но и недостаточная для формирования вязкопластичного граничного слоя температура нагрева зоны соединения. Повышение значения частоты вращения стержня до 2160 мин⁻¹ при сохранении без изменения остальных технологических параметров режима процесса фрикционной наплавки позволяет несколько увеличить температуру нагрева зоны соединения. Однако это является недостаточным для образования неразъемного соединения (образец № 4, см. табл. 2). Вероятно, наличие на поверхности стальной пластины чрезмерного количества загрязнений препятствует физическому контакту вращающегося стержня и подложки в процессе фрикционной наплавки, ограничивая возможность получения неразъемного соединения.

Предварительная операция лужения, заключающаяся в нанесении на поверхность стальной подложки тонкого (толщиной не более 0,5 мм) слоя олова, не позволяет получить наплавленное покрытие на поверхности стальной подложки даже при максимальной частоте вращения прутка (образец № 3, см. табл. 2). Возможно, область контакта между алюминиевым прутком и поверхностным слоем из олова характеризуется низкими значениями коэффициента трения. Вследствие этого тепловыделение в зоне соединения является недостаточным для формирования вязкопластичного граничного слоя, что препятствует получению неразъемного соединения в процессе фрикционной наплавки.

Проведение комплексной предварительной подготовки поверхности подложки, включающей механическую и химическую обработку, приводит к получению неразъемного соединения между стальной подложкой и поверхностным покрытием из алюминия даже при минимальном значении продольной линейной скорости перемещения стержня (образец № 2, см. табл. 2). Увеличение линейной скорости перемещения стержня от 82 до 104 мм/мин при сохранении

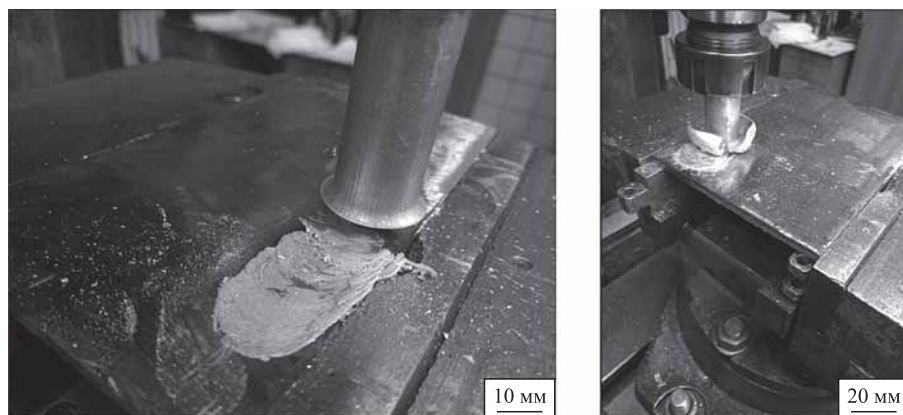


Рис. 2. Образцы ФГСК, изготовленные фрикционной наплавкой

2. Технологические параметры режима фрикционной наплавки

Номер образца	Способ подготовки поверхности	Число проходов	Продольная скорость перемещения стержня, мм/мин	Частота вращения стержня, мин ⁻¹	Результат
1	Без подготовки	1	82	1400	Соединение не сформировано
2	Механическая и химическая			2160	Соединение сформировано
3	Лужение				Соединение не сформировано
4	Без подготовки				Соединение сформировано
5	Механическая и химическая			104	
6*	Механическая и химическая	2	82		

* Наплавка слоя с перекрытием, равным 0,5 ширины валика.

без изменения остальных технологических параметров режима процесса фрикционной наплавки приводит, вероятно, к некоторому снижению температуры нагрева зоны соединения (образец № 5, см. табл. 2). Следствием изменения условий формирования вязкопластичного граничного слоя является уменьшение с 26 до 22 мм ширины наплавленного слоя, сформированного за один проход (рис. 3).

Процесс фрикционной наплавки позволяет наносить не только единичные валики, но и покрытия, состоящие из двух и более валиков. При значениях частоты вращения и продольной линейной скорости перемещения стержня 2160 мин⁻¹ и 82 мм/мин соответственно получены покрытия из двух валиков, характеризующиеся коэффициентом перекрытия соседних валиков, равным 0,5 ширины валика (образец № 6, см. табл. 2).

Исследования структуры изготовленных образцов ФГСК, выполненные средствами электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа, позволили установить, что во всем диапазоне опробованных параметров процесса фрикционной наплавки на границе раздела между стальной подложкой и алюминиевым покрытием образуется сплошной интерметаллидный слой (рис. 4). По химическому составу он представляет собой соединения системы Fe—Al разной стехиометрии. Со стороны алюминиевого слоя преимущественно формируются интерметаллиды на основе алюминия FeAl₃ и Fe₂Al₃, обладающие максимальными среди интерметаллидов двойной системы Fe—Al значениями твердости. Интерметаллиды на основе железа Fe₂Al₃, FeAl, Fe₃Al, имеющие меньшую твердость, образуются в области, прилегающей к стальной подложке.

Толщина сформированного слоя интерметаллидов во всех образцах находится в диапазоне от 1 до 3 мкм, что в 3—4 раза меньше, чем в образцах ФГСК, изготовленных авторами работы [11] процессом дуговой наплавки (см. рис. 4). Это связано с меньшими температурами нагрева границы раздела, достигаемыми в процессе фрикционной наплавки, по сравнению с дуговой наплавкой, т.е. ограничивается диффузионное взаимодействие между алюминием и железом.

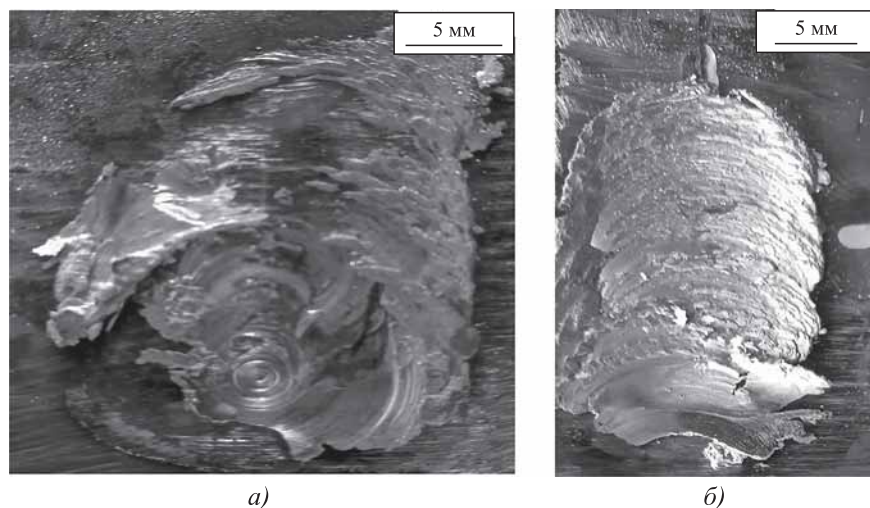


Рис. 3. Наплавленные покрытия на образцах № 2 (а) и № 5 (б)

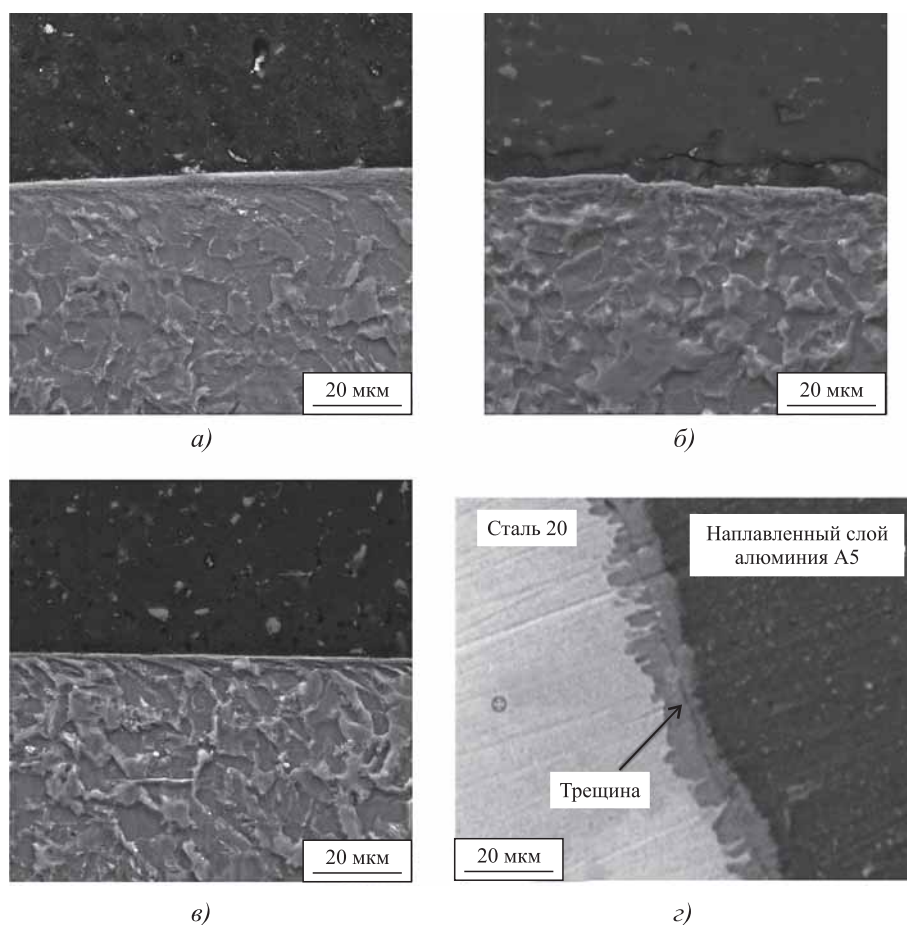


Рис. 4. Микроструктуры интерметаллидного слоя на границе раздела сталь—алюминий в образцах № 2 (а), № 5 (б), № 6 (в) и образца, изготовленного процессом дуговой наплавки (г)

Не стоит также исключать влияние механического воздействия, оказываемого вращающимся стержнем, на интерметаллидный слой в процессе фрикционной наплавки. Следствием этого процесса является дробление и измельчение интерметаллидов, формирующих слой малой толщины.

Таким образом, применение фрикционной наплавки позволяет получать образцы ФГСК со сплошным слоем из интерметаллидов системы Fe—Al разного стехиометрического состава толщиной не более 3 мкм, что позволяет ожидать высокие значения адгезионной прочности поверхностного алюминиевого слоя к стальной подложке.

Заключение. Показана принципиальная возможность применения процесса фрикционной наплавки для получения функционально-градиентных слоистых композиций триботехнического назначения на базе конструкционных

сталей с рабочими слоями из алюмоматричных КМ.

Определено влияние технологических параметров процесса фрикционной наплавки: частоты вращения стержня ($1400 \dots 2160 \text{ мин}^{-1}$), продольной линейной скорости перемещения стержня ($82 \dots 104 \text{ мм/мин}$) и способа предварительной подготовки поверхности подложки на возможность получения и особенности формирования наплавленного слоя.

Установлено, что применение процесса лужения или отсутствие предварительной подготовки поверхности подложки не позволяет сформировать соединение в диапазоне значений частоты вращения стержня от 1400 до 2160 мин^{-1} . Сочетание механической и химической предварительной обработки поверхности подложки приводит к образованию соединения между подложкой и наплавленным слоем даже при минимальном (82 мм/мин) из опробованных

значений продольной линейной скорости перемещения стержня.

Вследствие низких значений температур нагрева, а также механического воздействия в процессе фрикционной наплавки интерметаллидный слой, образующийся на границе раздела образцов ФГСК, характеризуется толщиной в 3–4 раза меньше, чем на образцах, полученных процессом дуговой наплавки (1...3 мкм против 4...10 мкм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Development** and testing of Al–SiC and Al–TiC composite materials for application in friction units of oil-production equipment / T.A. Chernyshova, R.S. Mikheev, I.E. Kalashnikov, I.V. Akimov, E.I. Kharlamov // *Inorganic materials: Applied research*. 2011. Vol. 2. No. 3. P. 282–289.
2. **Advance** research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications / P. Garg, A. Jamwal, D. Kumar, K. Sadasivuni, C. Hussain, P. Gupta // *Journal of materials research and technology*. 2019. Vol. 8. No. 5. P. 4924–4939.
3. **Sharma V., Prakash U., Manoj Kumar B.V.** Surface composites by friction stir processing: A review // *Journal of materials processing technology*. 2015. Vol. 224. P. 117–134.
4. **Михеев Р.С.** Инновационные пути в создании антифрикционных композиционных покрытий на основе цветных сплавов с повышенными триботехническими свойствами // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2018. № 5. С. 204–210.
5. **Mechanical** properties of 5052/2017 dissimilar aluminium alloys deposit by friction surfacing / H. Tokisue,

K. Katoh, T. Asahina, T. Usiyama // *Materials transactions*. 2006. Vol. 47. No. 3. P. 874–882.

6. **Microstructure** and mechanical properties of Al/steel dissimilar welds fabricated by friction surfacing assisted friction stir lap welding / L. Zhou, M. Yu, B. Liu, Z. Zhang, S. Liu, X. Song, H. Zhao // *Journal of materials research and technology*. 2020. Vol. 9. No. 1. P. 212–221.

7. **Friction** welding of aluminium and aluminium alloys with steel / A. Ambroziak, M. Korzeniowski, P. Kustron, M. Winnicki, P. Sokolowski, E. Harapinska // *Advances in materials science and engineering*. 2014. Special Issue. Article ID 981653.

8. **Swinner F., Faes K., De Waele W.** Feasibility study of the friction surfacing process // *International journal sustainable construction and design*. 2017. Vol. 8. No. 1. <https://doi.org/10.21825/scad.v8i1.6813>.

9. **Badheka K., Badheka V.** Friction surfacing of aluminium on steel: an experimental approach / K. Badheka, V. Badheka // *Materials today: proceedings*. 2017. Vol. 4. No. 9. P. 9937–9941.

10. **Friction** surfacing of aluminium alloy 5083 on DH36 steel plate / H. Li et al. // *Metals*. 2019. 9 (4). 479. <https://doi.org/10.3390/met9040479>.

11. **Исследование** влияния промежуточного алюминиевого слоя на механизм образования интерметаллидов при синтезе функционально-градиентных слоистых сталеалюминиевых композиций / Р.С. Михеев и др. // *Сварка и диагностика*. 2018. № 5. С. 19–23.

Александр Дмитриевич Мальнев;

Сергей Викторович Глуховской;

Роман Сергеевич Михеев, д-р техн. наук,

mikheev@bmstu.ru



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

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

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

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



Способы изготовления трехслойных уплотнителей с наружными металлическими и центральным эластичным слоями

Установлены предельные значения толщин наружных металлических слоев для трехслойных уплотнителей при обычной вырубке и пробивке. Разработаны новые способы изготовления указанных уплотнителей с увеличенной толщиной наружных металлических слоев.

Ключевые слова: трехслойный уплотнитель; вырубка—пробивка; фигурные инструменты; термо-расширенный графит.

The limit values for the thicknesses of the outer metal layers for three-layer seals are established for conventional blanking and punching. New methods for manufacturing of these seals with increased thickness of the outer metal layers are developed.

Keywords: three-layer seal; blanking—punching process; figured tools; thermally expanded graphite.

1. Теоретическое определение зависимости предельной толщины наружных металлических слоев уплотнителей, допускающих при изготовлении обычную вырубку—пробивку. Трехслойные уплотнители с наружными металлическими слоями различной толщины и центральным слоем из терморасширенного соляной кислотой графита (ТРГ) находят важное и широкое применение в различных отраслях промышленности. Изготовление указанных уплотнителей (в определенном диапазоне соотношений толщин металлических слоев и слоя ТРГ) вырубкой—пробивкой из листа или рулона гибкой ленты вызывает определенные трудности, поскольку не представляется возможным использовать жесткий прижим [1—4]. Как правило, это приводит к повреждениям или полному разрушению центрального эластично-хрупкого слоя.

При изготовлении вырубкой—пробивкой из листа трехслойных уплотнителей с наружными металлическими слоями наиболее важными свойствами центрального слоя ТРГ являются его сжимаемость и восстанавливаемость без существенных искажений и разрушения [5, 6].

Таким образом, установлено, что предельная сжимаемость ТРГ до 40 % позволяет после снятия нагрузки восстановить определенную толщину без разрушения и недопустимых повреждений. При этом в зависимости от типа конструкции прокладок и фланцевых соединений, а также от свойств эксплуатационной среды предельное рабочее давление на поверхность центрального слоя из ТРГ, не вызывающее остаточных деформаций после вырубке или пробивки, может составлять до 40 МПа [1—4].

Очевидно, что в зависимости от механических свойств металла наружных слоев и при малых их толщинах, используя упругие свойства ТРГ, применение обычной вырубке или пробивки не вызовет проблем. Однако при относительном увеличении толщины указанных металлических слоев следует изменять конфигурацию рабочего инструмента вырубке—пробивки или использовать другие способы изготовления таких уплотнителей.

В общем виде расчетную силу вырубке (пробивки) определяют по формуле

$$P = LS\sigma_{cp}k, \quad (1)$$

где L — периметр изделия или отверстия, для круглого изделия — $L = \pi D$, мм; S — толщина материала; $\sigma_{ср}$ — сопротивление материала срезу, принято $\sigma_{ср} = (0,8...0,9)\sigma_B$, МПа, где σ_B — предел прочности (временное сопротивление разрыву при одноосном растяжении); $k = 1,2...1,3$ — коэффициент запаса, учитывающий состояние режущих кромок инструмента и неравномерность материала по толщине.

На рис. 1 приведена схема процесса обычной вырубке трехслойных обычных уплотнителей с наружными металлическими слоями и центральным эластичным слоем из терморасширенного графита.

Потребная для реализации данной операции технологическая сила P пропорционально зависит от толщины заготовки S . Поэтому при известном значении предельного значения силы $P_{пред}$ можно определить предельную толщину заготовки:

$$S_{пред} = \frac{P_{пред}}{L\sigma_{ср}k} = \frac{P_{пред}}{\pi D\sigma_{ср}k}. \quad (2)$$

Давление, приложенное к заготовке:

$$Q = \frac{P}{A},$$

где P — технологическая сила, Н; A — площадь заготовки, лежащая под инструментом, мм², в данном случае $A = \frac{\pi D^2}{4}$.

Тогда предельная сила:

$$P_{пред} = Q_{max}A = Q_{max} \frac{\pi D^2}{4}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим предельную толщину заготовки:

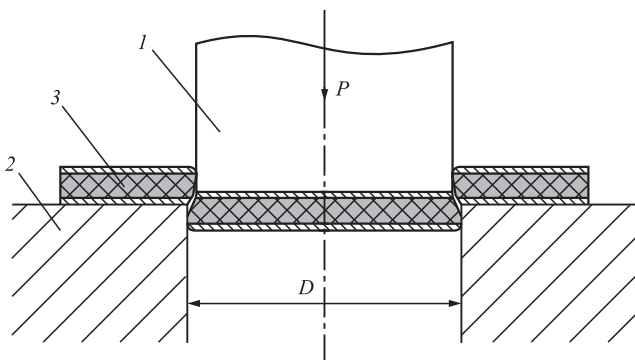


Рис. 1. Схема обычной вырубке:

1 — вырубной пуансон; 2 — вырубная матрица; 3 — исходная заготовка (полоса)

$$S_{пред} = \frac{P_{пред}}{\pi D\sigma_{ср}k} = Q_{max} \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{1}{\pi D\sigma_{ср}k} = \frac{Q_{max}D}{4\sigma_{ср}k}. \quad (4)$$

Выполнены расчеты определения предельной толщины металлического слоя многослойного материала, допускающего возможность применения обычной вырубке и пробивки, при которых технологическая сила не превышает предельные значения. Исследовано влияние диаметра D вырубной детали (пробиваемого отверстия) на предельную толщину наружных металлических слоев для различных металлов. Расчеты выполнены для указанных материалов и в следующих диапазонах изменения технологических параметров: диаметр детали $D = 10...100$ мм; материал наружных металлических слоев: нержавеющая сталь AISI 316 (российский аналог — сталь 08X18H10 [7]), медь М1, латунь Л63 (в твердом состоянии), сплав монель 400 (российский аналог — медно-никелевый сплав НМЖМц28-2,5-15) [8], никелевый сплав НХ9.

На рис. 2 приведены зависимости изменения предельной толщины материала $S_{пред}$ от диаметра вырубной детали (пробиваемого отверстия) D для различных марок металлических слоев уплотнителей.

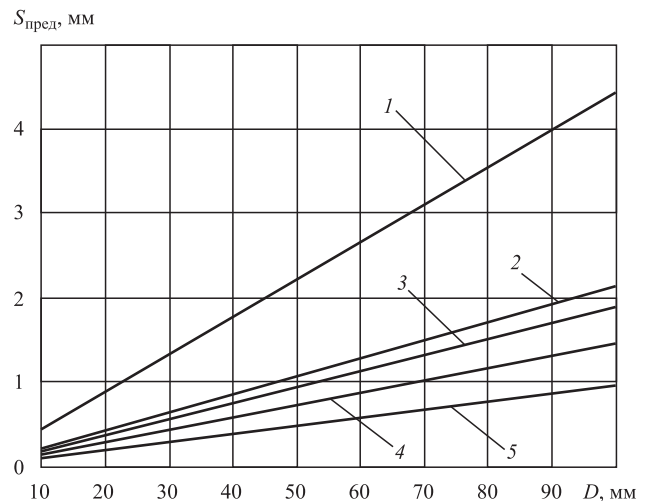


Рис. 2. Зависимости предельных толщин наружных металлических слоев от диаметра, по которому реализуется разделительная операция для различных материалов: 1 — медь М1; 2 — нержавеющая сталь AISI 316 (российский аналог — сталь 08X18H10); 3 — сплав Monel 400 (российский аналог — медно-никелевый сплав НМЖМц28-2,5-15); 4 — латунь Л63 (в твердом состоянии); 5 — никелевый сплав НХ9

Анализ графических зависимостей позволил установить, что при фиксированном диаметре вырубаемой прокладки толщина металлического слоя превышает предельные значения в случаях, когда точки на графике оказываются выше, чем соответствующие линии для конкретного металла или сплава. В этом случае фиксированная сила обычной вырубки превышает допустимое значение, соответственно давление, приложенное к поверхности центрального эластичного слоя из ТРГ, превышает допустимое предельное значение 40 МПа, а в некоторых конструктивных вариантах, работающих в особо сложных условиях, — и меньших допустимых предельных значений.

2. Экспериментальная проверка зависимости предельной толщины наружных металлических слоев уплотнителей, допускающих при изготовлении обычную вырубку—пробивку. В результате теоретических расчетов установлена зависимость (4) предельной толщины наружных металлических слоев, получаемых обычной выружкой—пробивкой, от предела текучести на срез применяемого металла, от допускаемого предельного поверхностного контактного давления, прикладываемого к центральному эластичному слою из ТРГ и от диаметра окружности реализуемой вырубки—пробивки. Однако указанная зависимость получена с использованием обобщенных эмпирических соотношений и не учитывает конструктивных особенностей формирования рабочей зоны спроектированного штампа, работы прижимов и инструмента в условиях изготовления рассматриваемых трехслойных уплотнителей.

В связи с изложенным возникла необходимость экспериментальной проверки зависимости (4) по определению предельных толщин наружных слоев вырубаемого (пробиваемого) изделия для некоторых конкретных металлов и сплавов, широко используемых в трехслойных прокладочных и уплотнительных элементах. Исследования проводили на упрощенном опытном варианте проектируемого автоматизированного штампа.

Предварительные статистические расчеты [9] показали, что равномерно составленная выборка для каждого исследуемого материала, состоящая из 75 экспериментальных результатов, является репрезентативной (представительной), т.е. удовлетворяет соответствующим требованиям по однородности и объему частных значений исследуемого признака (метод последовательных приближений). Это обеспечит качественные выборочные оценки соответствующих генеральных характеристик.

В качестве объекта исследований для проведения экспериментов приняты трехслойные уплотнители с наружными металлическими слоями и центральным — из терморасширенного графита. Материалы наружных металлических слоев: нержавеющая сталь AISI 316 и медь М1. Диаметр вырубки—пробивки $D = 10...150$ мм. Допустимое предельное контактное давление на эластичный слой $Q_{\max} = 20...40$ МПа. Устанавливаемая предельная толщина металлических слоев $S_{\text{пред}}$, мм.

Далее приведены результаты экспериментальных исследований с последующей трехмерной их аппроксимацией с помощью компьютерной программы "Table Curve 3D" соответствующим полиномом. После статистической обработки экспериментальных данных по программе "Table Curve 3D" были получены следующие трехмерные поверхности взаимосвязи трех переменных (рис. 3) и статистические дан-

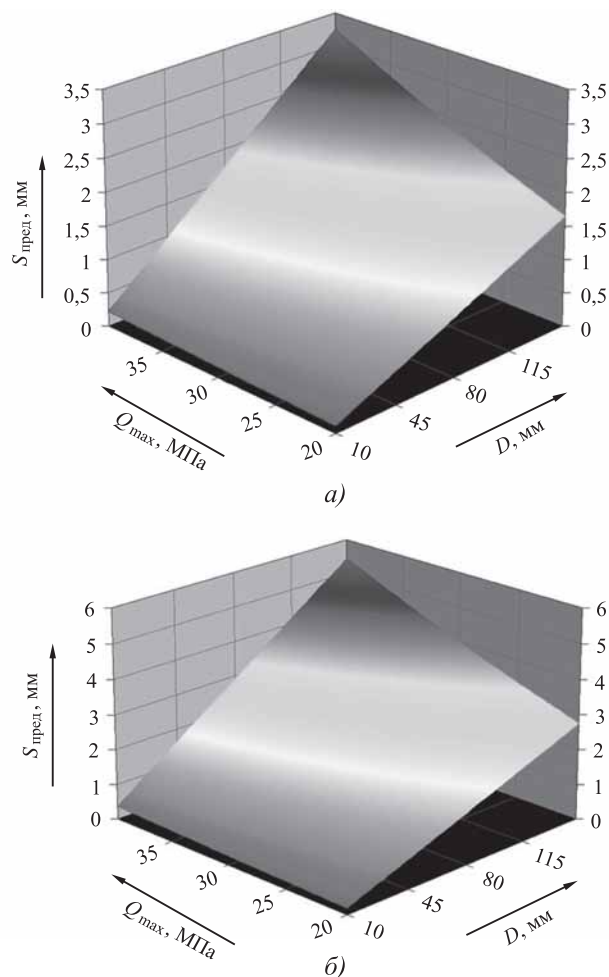


Рис. 3. Графическая иллюстрация аппроксимации поверхностью искомой трехмерной зависимости между указанными параметрами:

a — нержавеющая сталь AISI 316 ($\sigma_{\text{ср}} = 390$ МПа);
b — твердая холоднокатанная медь М1 ($\sigma_{\text{ср}} = 235$ МПа)

Параметры аппроксимации для стали AISI 316/меди М1

Параметр	Величина параметра		
Общий вид полинома	$\ln z = a + b \ln x + cy^{0,5}$		
Коэффициент детерминации	$r^2 = 0,9995$		
Уровень доверительной вероятности коэффициента детерминации	$\beta = 0,9995$		
Стандартная ошибка	$\mu = 0,0174/0,0291$		
Критерий Фишера	$F = 74627,47$		
Параметры коэффициентов аппроксимирующего полинома	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
	-6,1447/-5,6304	1,0000	0,3657
Стандартная ошибка	0,0230	0,0040	0,0028/0,0023
Критерий Стьюдента	-266,84/-244,51	248,91	160,41
95%-ные доверительные границы	-6,1906...-6,0988/-5,6763...-5,5845	0,9920...1,0080	0,3611...0,3702

ные их аппроксимации соответствующими полиномами (см. таблицу).

3. Совершенствование способа для вырубки—пробивки трехслойных уплотнителей с увеличенной толщиной наружных металлических слоев. Для изготовления трехслойных уплотнителей с наружными металлическими слоями увеличенной толщины следует использовать новые разработанные способы, такие как вырубку—пробивку пуансоном и матрицей, имеющих на рабочих торцах кольцевой фигурный венец клиновидного профиля. При этом общий периметр вырубki—пробивки локализуется и, соответственно, снижаются потребная технологическая сила и контактное давление на плоскости центрального эластичного слоя из ТРГ.

Соотношение толщин центрального эластичного слоя S_3 и наружных металлических слоев S_m при вырубке и пробивке указанных уплотнителей также целесообразно оценивать относительным параметром $f = S_3/S_m$. Общий комплекс расчетных и экспериментальных исследований технологических возможностей вырубki—пробивки трехслойных уплотнителей с наружными металлическими слоями проводили в диапазоне относительных толщин от $f = 1,5$ до $f = 8,5$.

На рис. 4 приведена схема операции вырубki инструментом с кольцеобразным фигурным венцом на пуансоне и матрице, рекомендуемым для изготовления уплотнителей, имеющих отношение увеличенной толщины центрального эластичного слоя S_3 к толщине

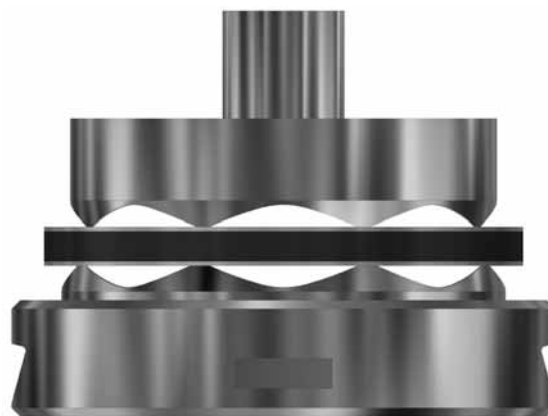


Рис. 4. Схема операции вырубki инструментом с фигурным венцом и клиновыми выступами по наружному контуру венца (цилиндрический прижим в матрице не показан)

наружных металлических слоев S_m : $4,0 \leq f = S_3/S_m \leq 8,5$. Клиновые выступы на фигурных венцах матрицы и пуансона для операций вырубki (обрезки по наружному контуру) и пробивки выполнены таким образом, что возникающие дефекты и искажения формируются (в основном) в отходе от реализации указанных операций.

В случае мелкосерийного многономенклатурного производства, когда часто отход пробивки при изготовлении указанных уплотнителей относительно большого диаметра является заготовкой для вырубki—пробивки уплотнителей меньшего диаметра, разработка конструкции инструмента, уменьшающая склонность отделяемого элемента к изгибу, имеет важное значение для операции вырубki и для пробивки.

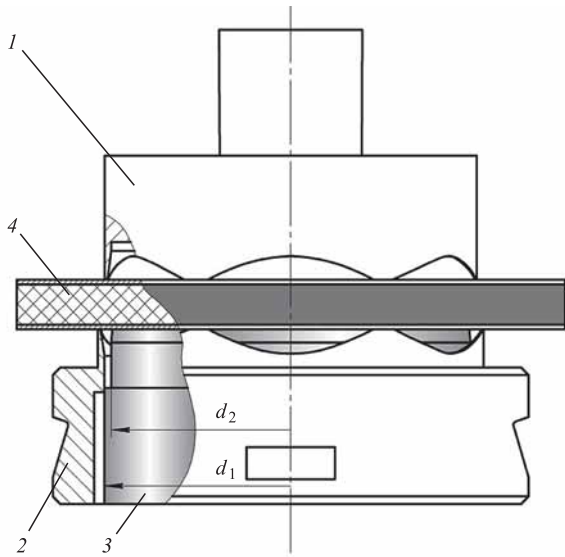


Рис. 5. Схема операции пробивки инструментом с фигурным венцом с клиновыми выступами по наружному контуру венца у пуансона и матрицы:

1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — подпружиненный прижим-выталкиватель; 4 — заготовка

На рис. 5 представлена аналогичная схема операции пробивки. В этом случае венцы имеют клиновые выступы на внутреннем контуре.

На рис. 6 показаны соответствующие твердотельные модели инструмента.

Если абсолютная толщина металлического слоя не позволяет использовать простую вырубку или пробивку, то в интервале относительных толщин $f = S_3/S_M \leq 4,0$ фигурный венец изготавливают только на пуансоне.

Уменьшить склонность к изгибу отделяемого элемента (полуфабриката вырубki или отхода пробивки) целесообразно путем установки в матрицу подпружиненного прижима 3 (рис. 7). По диаметру d_1 цилиндрического участка этот прижим контактирует и перемещается вдоль матрицы по скользящей посадке. В области торца, контактирующего с изготавливаемым уплотнителем, на нем выполнена ступень с диамет-



Рис. 6. Твердотельная модель фигурного пуансона (а) и фигурной матрицы (б) для пробивки

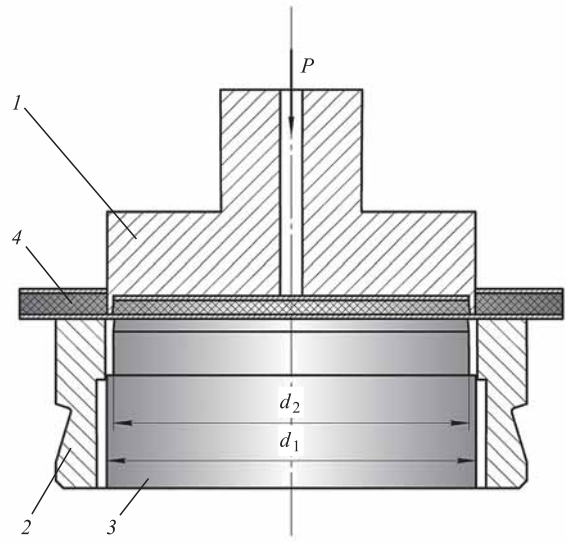


Рис. 7. Схема операций инструментом с фигурным венцом только на пуансоне

ром d_2 , несколько меньшим, чем сумма зазора между пуансоном и матрицей и размера, обеспечивающего входение в матрицу фигурной части венца пуансона.

Заключение. Для уплотнителей с центральным слоем из терморасширенного графита и наружными металлическими слоями увеличенной толщины, когда при обычной вырубке или пробивке реальные значения контактного давления на прокладку из ТРГ и степень ее сжатия (при изготовлении) превысят предельные значения, разработан новый способ вырубki и пробивки. Он основан на применении матрицы и пуансона, имеющих фигурный кольцевой венец (непосредственно реализующий операцию) с плавно сочетаемыми клиновыми (в меридиональном сечении инструмента) выступами и впадинами. Это позволяет локализовать зону обработки по периметру разделения на отдельные участки и значительно снизить контактные давления на поверхностные слои графитовой центральной прокладки.

Результаты экспериментальной апробации разработанных экспериментальных блоков, содержащих фигурные кольцевые венцы с клиновыми (в меридиональном сечении инструмента) выступами и впадинами, показали возможность увеличения предельных толщин наружных металлических слоев в зависимости от марки применяемого металла или сплава на 26...37 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **ТУ 5728-006-12058737—2005.** Прокладки уплотнительные из терморасширенного графита (ПУТГ). Технические условия. Пермь: ЗАО "НОВОМЕТ-ПЕРМЬ", 2005.

2. **ТУ 5728-003-12058737—2000.** Фольга из терморасширенного графита. Технические условия. Пермь: ЗАО "НОВОМЕТ-ПЕРМЬ", 2001.

3. **ТУ 5728-004-12058737—2002.** Материал прокладочный графитовый армированный (АГПМ). Пермь: ЗАО "НОВОМЕТ-ПЕРМЬ", 2003.

4. **РД 0154-06—2001.** Прокладки уплотнительные из терморасширенного графита (ПУТГ) до 20 МПа и 600 °С. Типы и размеры. Общие технические требования. Пермь: ЗАО "НОВОМЕТ-ПЕРМЬ", 2002.

5. **Технический стандарт США ASTM F-36—15.** Стандартный метод испытаний на сжимаемость и восстановление материалов и прокладок / Адаптировано для РФ подкомитетом F03.20 по методам механических испытаний. Кн. стандартов. Т. 09.02. С. 143—198.

6. **Караваев Д.М., Ханов А.М., Дегтярев А.И. и др.** Механические свойства композиционного материала на основе терморасширенного графита // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Том 14. № 1 (2). С. 562—564.

7. **ГОСТ 5949—2018.** Металлопродукция из сталей нержавеющей и сплавов на железоникелевой основе коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 32 с.

8. **ГОСТ 492—2006.** Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки. М.: Стандартинформ, 2011. 15 с.

9. **Ефимова М.Р., Петрова Е.В., Румянцев В.Н.** Общая теория статистики: учебник. М.: ИНФРА-М, 2009. 416 с.

*Геннадий Васильевич Панфилов, д-р техн. наук,
tulpan.2000@ya.ru;
Неуен Ван Тинь*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 621.771.67

DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-2-67-73

В.И. Котенок (АО АХК "ВНИИМЕТМАШ имени А.И. Целикова", г. Москва),
С.А. Кузнецов, С.А. Берестнев, П.Н. Тугушев
 (ООО фирма "ШПС", г. Москва)

Трехвалковый резьбонакатной стан-автомат СХПРС 20-50 для осевой накатки резьбы заданной длины

На основе технических решений, защищенных патентами РФ, создан специальный трехвалковый резьбонакатной стан-автомат СХПРС 20-50 для винтовой прокатки резьбы на участках заданной длины на гладких и ступенчатых штангах. Новый способ контроля длины накатываемой резьбы винта, заключающийся в использовании подвижного упора, положение которого контролируется с помощью датчика абсолютного положения и управляется программируемым контроллером, позволил расширить технологические возможности и повысить производительность оборудования за счет его быстрой переналадки на прокатку резьбы любой допустимой длины. В конце 2019 г. стан успешно запущен в АО "Транспневматика" (г. Первомайск) для накатки резьбы длиной 424...1600 мм на винтах с длиной 859...1600 мм.

Ключевые слова: осевая накатка резьбы; резьбонакатной стан; трехвалковый стан; резьба на валах с буртами.

Special three-roll automatic thread rolling mill SKhPRS 20-50 for screw thread rolling on sections of given length on smooth and stepped rods is created on the basis of technical solutions protected by patents of the Russian Federation. The new method for length controlling of the rolled thread of the screw, which consists in the use of movable stop, the position of which is controlled by absolute position sensor and controlled by programmable controller, made it possible to expand the technological capabilities and increase the productivity of the equipment due to its rapid changeover for rolling threads of any permissible length. At the end of 2019, the mill is successfully launched at the Joint-stock company "Transpnevmatika" (Pervomaysk) for rolling of thread 424... 1600 mm length on screws with length of 859... 1600 mm.

Keywords: axial thread rolling; thread rolling mill; three-roll mill; collared shafts thread.

Для накатки резьбы на длинных валах применяют технологию винтовой прокатки, реализуемую на трехвалковых станах, имеющих возможность разворачивать валки на угол подачи [1].

Основная масса трехвалковых станом винтовой прокатки предназначена для накатки резьбы на проход на гладких валах [2]. Однако существует большое количество изделий, в которых резьба находится на заданной длине (рис. 1, а) или на части изделия и ограничивается буртом (рис. 1, б).

Известна конструкция стана ЗХПВ-30 [3], рабочая клетка которого оснащена гидравлическими нажимными устройствами, а сведение или разведение валков осуществляется по

команде конечного выключателя, на который воздействует передний конец заготовки. Однако эта конструкция обладает существенными недостатками: трудоемкостью и небольшой

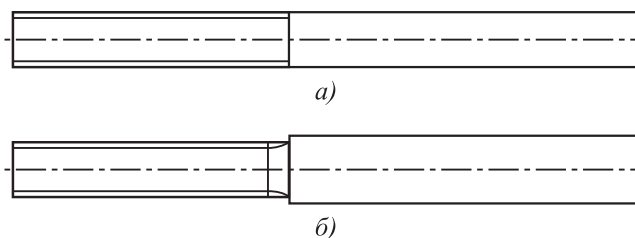


Рис. 1. Изделия с резьбой, расположенной на части его длины:

а — гладкая штанга; б — ступенчатый вал

точностью перенастройки стана на прокатку новой заготовки с другой длиной накатываемой резьбы. Такое решение мало приемлемо при большой номенклатуре прокатываемых изделий или при изготовлении малых партий.

Для устранения этих недостатков в ООО фирма "ШПС" совместно с АО АХК "ВНИИМЕТМАШ имени А.И. Целикова" был спроектирован специальный стан СХПРС 20-50 для накатки наружной резьбы, оснащенный подвижным упором с абсолютным датчиком положения, дающим сигнал на разведение валков при накатке резьбы заданной длины. Конструкция этого стана защищена патентом РФ № 2399454 [4].

Одной из ключевых особенностей стана СХПРС 20-50 стал инновационный способ контроля длины накатки резьбы винта, имеющие следующие преимущества:

- расширение технологических возможностей способа накатки и контроля длины накатки резьбы за счет увеличения диапазона длин накатываемой резьбы на винтах;
- увеличение производительности труда за счет уменьшения времени настройки;
- повышение точности накатки длины резьбы на винтах за счет применения новых технологий и инструментов контроля;
- упрощение процесса переналадки стана на прокатку винтов с другой длиной резьбы за счет механизации и автоматизации самого процесса наладки.

В дальнейшем на данный способ контроля длины также был получен патент РФ № 2408448 [5].

Технические характеристики стана СХПРС 20-50

Диаметр накатываемых винтов, мм	20...50
Максимальная сила металла на валки, кН	150
Максимальный крутящий момент на валке, Н·м	1300
Диаметр валков, мм, для типоразмера винтов:	
I (Ø20 мм)	100...120
II (Ø30...40 мм)	127,8...145
III (Ø40...50 мм)	170...185
Ширина валка, мм	108...120
Диапазон регулировки оборотов валков, об/мин	1...30
Максимальный угол разворота валка, °	±6

Максимальная длина накатанной резьбы, мм	800
Длина заготовок, мм	859...1600
Длина винта, мм	424...1600
Скорость выхода винта из валков, м/мин	0,5
Мощность главного двигателя стана, кВт	30

Схема размещения оборудования стана СХПРС 20-50 представлена на рис. 2.

Все узлы стана (1—6) установлены на общей раме 7, служащей одновременно баком для системы охлаждения и смазки.

Во вспомогательное технологическое оборудование стана входят: пульт управления станом; шкаф управления станом; гидростанция; система подачи технологической смазки; электрооборудование стана (электродвигатели, датчики и т.д.).

Узел загрузки и выгрузки (рис. 3) служит для автоматической поштучной подачи заготовок в зону прокатки и выдачи прокатанных изделий. Он представляет собой корпус коробчатой формы, на котором смонтированы все механизмы этого узла. Корпус установлен в направляющих рамы. На задней стенке корпуса закреплены четыре наклонных опоры стеллажа для укладки заготовок под прокатку. На верхней площадке находятся дозирующее устройство, приемный желоб и пневмоцилиндр для задачи заготовки в валки.

Дозирующее устройство состоит из вала с закрепленными на нем четырьмя дисками. Вал установлен в двух подшипниковых опорах и приводится в действие штоком пневмоцилиндра. Каждый диск имеет по одному фасонному вырезу, с помощью которого заготовка захватывается и выдается в приемный желоб. Кроме дисков на концах вала закреплены два рычага, каждый из которых соединен с желобом посредством промежуточных рычагов. С помощью этой системы рычагов осуществляется удаление прокатанной детали из желоба в приемный стеллаж.

Для удобства перевалки валков узел загрузки и выгрузки отводится от рабочей клетки с помощью электромеханического привода или ручной реечной передачи на расстояние 800 мм.

Рабочая клеть представляет собой станину с тремя валками, расположенными под углом 120° (рис. 4).

Узел валка (рис. 5) представляет собой вал на двух подшипниковых опорах с установ-

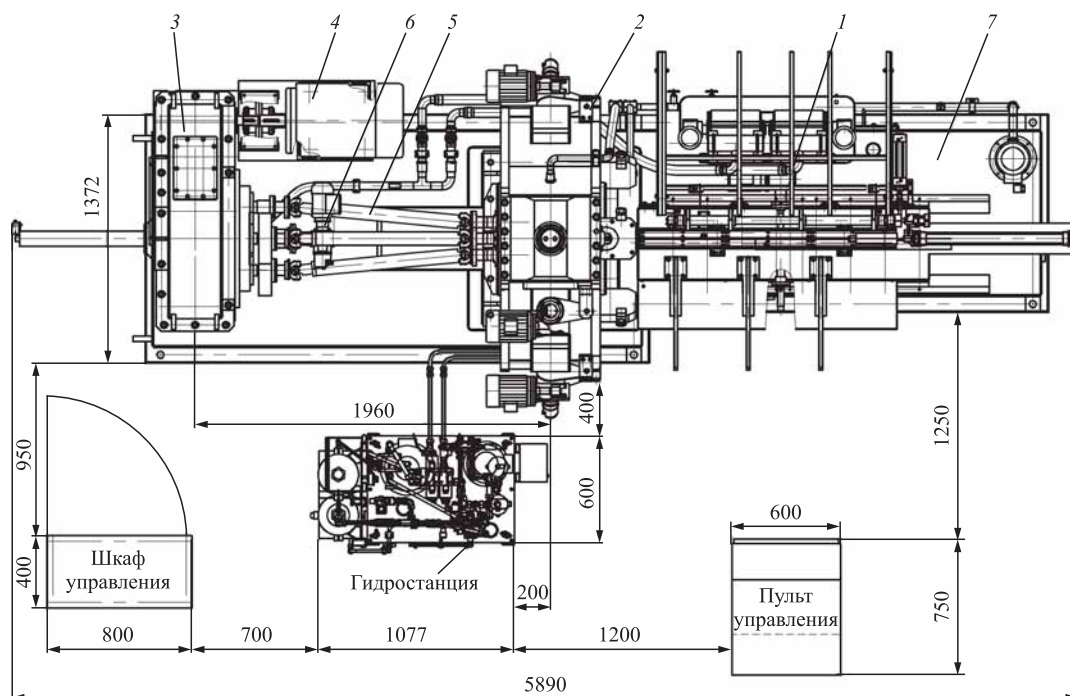


Рис. 2. Схема размещения оборудования стана СХПРС 20-50:

1 — узел загрузки и выгрузки; 2 — клеть рабочая; 3 — редуктор комбинированный; 4 — электродвигатель АДЧР 200; 5 — три шпинделя универсальных; 6 — выталкиватель; 7 — рама-резервуар СОЖ

ленным между ними инструментом. Одна из подшипниковых опор выполнена в виде быстросъемной подушки, при снятии которой открывается доступ к валку при перевалке. Узлы валков крепятся с помощью ласточкиного хвоста и клина к глухим торцам гидроцилиндров, расположенных в специальных установочных винтах.

Рабочая сила и радиальное перемещение валков создаются с помощью гидроцилиндров, которые установлены в корпусе клетки.

Поршни гидроцилиндров неподвижно закреплены в осевом направлении через сферические шайбы в крышках корпуса.

В рабочем положении корпуса цилиндров опущены до упора в регулировочные втулки, создавая силы предварительного напряжения.

Ограничителем хода валков при разведении валков служат корпуса гидроцилиндров, упирающиеся в крышку станины клетки.

Для регулировки положения узлов валков в клетке предусмотрены механизмы радиальной настройки. Установка требуемого раствора валков осуществляется для каждого валка отдельно вращением от мотор-редуктора установочных винтов с помощью цилиндрической зубчатой передачи.

Привод цилиндрической зубчатой передачи осуществляется от червячного мотор-редуктора

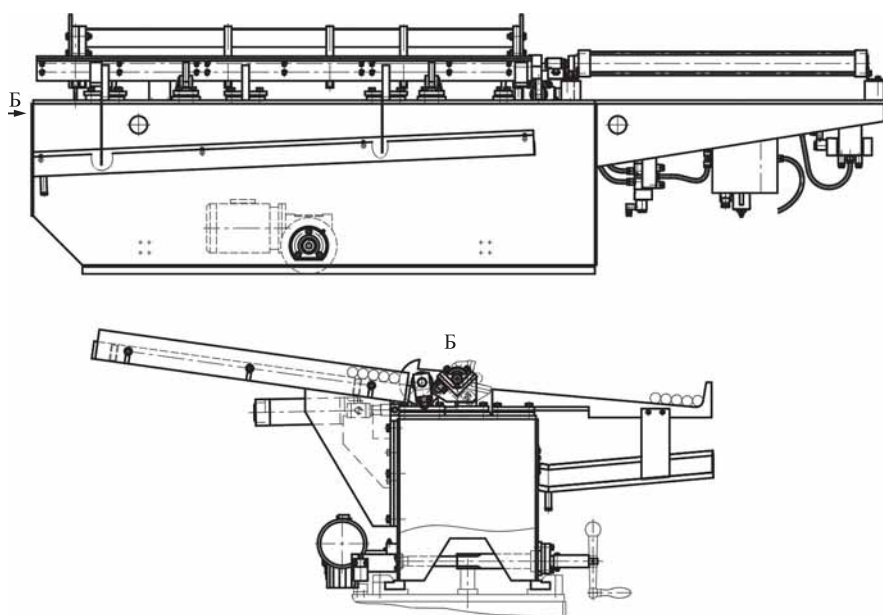


Рис. 3. Конструкция узла загрузки и выгрузки

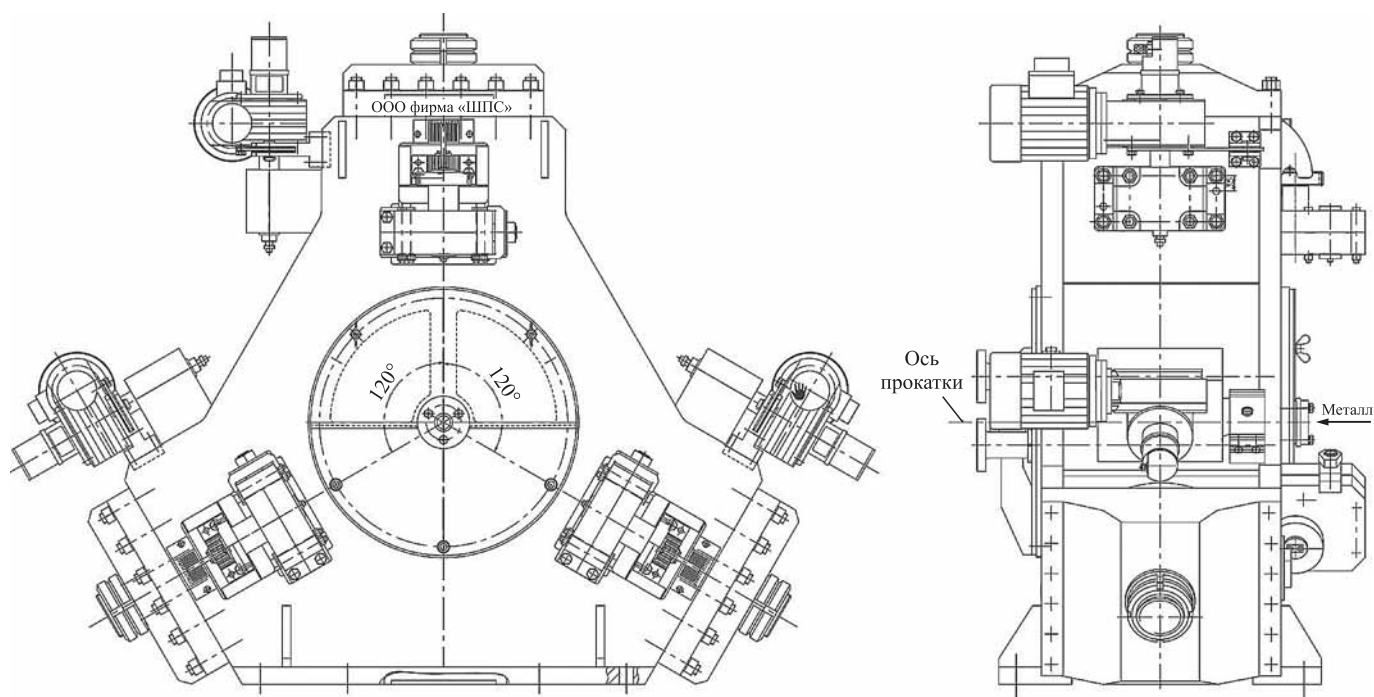


Рис. 4. Клеть рабочая

с регулируемой частотой вращения. Включение привода возможно только при отключенном давлении в гидроцилиндрах.

Радиальное перемещение осуществляется для каждого узла валков отдельно. Положение узлов валков контролируется датчиками положения (энкодерами), установленными на тихоходных валах червячных мотор-редукторов.



Рис. 5. Узел валка с фальш-валком

Контроль крайнего разведенного положения валков осуществляется бесконтактным путевым выключателем.

Режим работы приводов — кратковременный, реверсивный. Настройка положения валков выполняется в режимах ручного управления и автоматической установки в заданное положение с индикацией фактического положения на панели оператора.

Главный привод состоит из асинхронного электродвигателя переменного тока, управляемого от частотного преобразователя, и трехступенчатого цилиндрического редуктора с тремя выходными валами.

Режим работы главного привода длительный, реверсивный.

Редуктор главного привода предназначен для преобразования вращения главного двигателя стана во вращение трех рабочих валков прокатной клетки стана.

Корпус и крышка редуктора — сварные. Смазка зубчатых зацеплений — картерная.

Второй промежуточный вал редуктора выполнен полым и в его расточке размещена проводка, через которую проходит рейка выталкивателя прокатанной заготовки из рабочей клетки.

Передача крутящего момента от выходных валов редуктора главного привода к рабочим

валкам прокатной клетки осуществляется посредством карданных валов. Два из трех карданных валов соединены с выходными валами редуктора через муфты угловой настройки, что позволяет поворачивать два вала относительно третьего для совмещения калибров валков при наладке.

Рабочая клеть и редуктор главного привода смонтированы на общей раме.

Гидропривод состоит из автономной, отдельно стоящей гидростанции, делителя потока, подводящих трубопроводов и трех встроенных гидроцилиндров нажимных механизмов клетки.

Гидростанция состоит из бака, на верхней крышке которого размещены установка насоса, гидроблоки управления, пневмогидроаккумулятор, сливной фильтр и заливная горловина.

Гидробак оборудован уровнем с электрическим сигнализатором нижнего уровня масла и термометром, заливной горловиной, выполняющей функцию воздушного сапуна, датчиком температуры и гидроаккумулятором, поддерживающим постоянный рабочий диапазон высокого давления.

Гидростанция оборудована датчиком температуры, контролирующим максимально допустимый уровень температуры масла в баке гидростанции, и датчиками давления, контролирующими давление масла в пневмогидроаккумуляторе и гидроцилиндрах.

С помощью делителя потока осуществляется синхронизация движения гидроцилиндров на сведение и разведение валков.

Наличие редукционного клапана обеспечивает постоянную силу прижима, не зависящую от колебания давления в гидроаккумуляторе.

В состав пневмопривода входят: блок подготовки воздуха, состоящий из крана ручного включения, фильтра-регулятора и реле давления, пневмораспределители, пневмоцилиндр заталкивателя и пневмоцилиндр узла выгрузки и загрузки.

Пневмоцилиндры оборудованы датчиками конечных положений.

С помощью крана ручного включения осуществляется подвод сжатого воздуха к фильтру-регулятору пневмосистемы, а также сброс воздуха из пневмосистемы в атмосферу. Фильтр-регулятор обеспечивает фильтрацию сжатого воздуха, очищая его от механических частиц загрязнения и от капельной влаги, кроме того, он поддерживает на выходе постоянный, стабильный уровень давления, который зависит

только от настройки и не зависит от колебания давления в цеховой пневмосети.

Реле давления контролирует наличие необходимого уровня давления сжатого воздуха в пневмосистеме.

Для управления пневмоцилиндром узла выгрузки и загрузки используется пневмораспределитель с двумя электромагнитами, что исключает самопроизвольное движение при отключении электрического напряжения. Этот пневмоцилиндр будет находиться в положении, определяемом последним включением электромагнита.

При включении электромагнита пневмораспределителя пневмоцилиндр заталкивателя осуществляет подачу заготовки к валкам рабочей клетки.

При его отключении пневмоцилиндр заталкивателя возвращается в исходное втянутое положение.

Система подачи СОЖ стана холодной прокатки винтов состоит из центробежного электронасоса с номинальным давлением 0,25 МПа и производительностью 100 л/мин, который подает охлаждающую жидкость через вентили и шланги в трубчатые разбрызгиватели с отверстиями, обеспечивающими подачу охлаждающей жидкости на валки.

Отработанная охлаждающая жидкость сливается через приемный фильтр в устройство для сбора масла узла насоса для перекачки масла, из которого она посредством электронасоса с номинальным давлением 0,063 МПа и производительностью 100 л/мин через магнитные сепараторы подается в чистую секцию бака.

Конструкция устройства для сбора масла позволяет откачивать загрязненное масло непосредственно из емкости устройства без попадания в бак рамы стана.

Для установки небольшого подпора в выходной линии электронасоса предусмотрены вентили. Для регулировки подачи охлаждающей жидкости на разбрызгиватели предусмотрен вентиль, при открытии которого сбрасывается лишняя охлаждающая жидкость в чистую секцию бака.

Особенностью стана СХПРС 20-50 стало применение запатентованного устройства, позволяющего осуществлять накатку резьбы на участке заготовки заданной длины с высокой точностью.

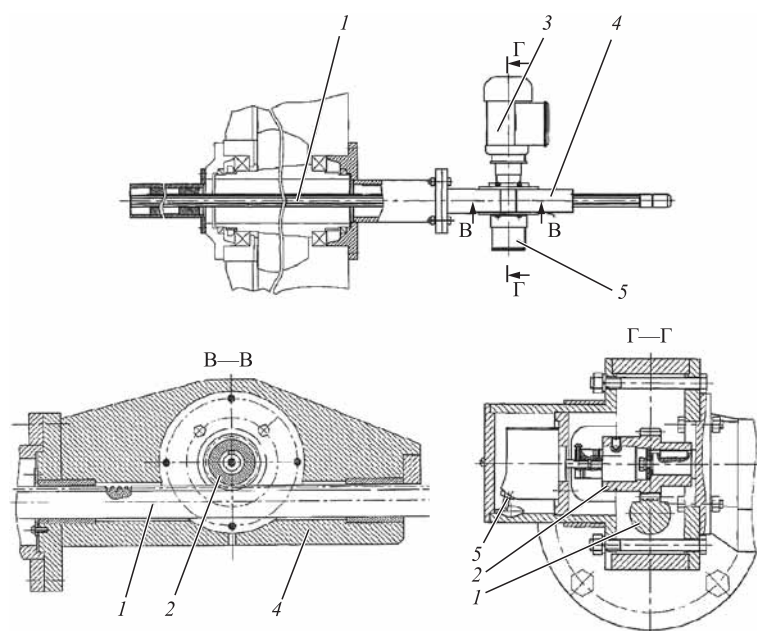


Рис. 6. Устройство выталкивателя

Выталкиватель (рис. 6) состоит из реечного механизма с приводом от одноступенчатого цилиндрического мотор-редуктора. Выталкиватель крепится с помощью кронштейна к корпусу редуктора главного привода. Рейка 1 выталкивателя в поперечном сечении имеет форму сегмента с зубьями наверху и приводится в движение зубчатым колесом 2, закрепленным на выходном валу мотор-редуктора 3. Рейка установлена в корпусе 4 и имеет возможность возвратно-поступательного продольного перемещения по оси стана и взаимодействия с торцом накатываемого винта, причем она располагается на оси клетки. Для измерения и фиксации перемещений рейки выталкивателя установлен датчик угловых перемещений 5, жестко связанный муфтой с зубчатым колесом 2.

Назначение датчика — устанавливать длину накатки резьбы, выдавать сигнал на разведные валки при его смещении накатываемой заготовкой, включать привод выталкивателя для возврата прокатанной заготовки в желоб, а рейки в исходное положение и выгрузки заготовки из желоба в карман.

Сигнал от датчика положения поступает в контроллер и после его обработки выдаются управляющие сигналы на исполнительные механизмы.

Управление механизмами и технологическим процессом прокатки, а также диагностика состояния отдельных систем осуществляются

программируемым логическим контроллером (ПЛК), имеющим в своем составе блок центрального процессора CPU и модули дискретных входов DI и выходов DO.

Для ввода и отображения информации автоматическая система управления (АСУ) оснащена сенсорной панелью с диагональю экрана 12 дюймов.

АСУ предусмотрены необходимые защиты и блокировки, предотвращающие недопустимые режимы работы всех систем стана, а также исключают нарушение последовательности технологических операций. Система диагностики обеспечивает идентификацию места возникновения неисправности.

В состав поставляемого электрооборудования входит:

- шкаф управления с преобразователями частоты, пусковой и защитной аппаратурой, ПЛК, стабилизированными источниками питания и т.д.

- пульт управления, на котором расположена сенсорная панель и органы управления;
- датчики, расположенные непосредственно на механизмах, а также встроенные в системы стана (путевые выключатели, датчики давления, температуры и т.д.).

Управление станом проводится централизованно с одного пульта управления. На пульте установлены органы управления и сигнализации для ручного и автоматического режимов, а также сенсорная панель, с которой оператор вводит в систему параметры режима прокатки и осуществляет мониторинг требуемых переменных.

Настройка стана на прокатку резьбы заданной длины выполняется с пульта управления, на сенсорной панели которого в определенном окне меню вводится требуемое значение длины. В начале автоматического цикла прокатки рейка перемещается в заданное положение. Управление электродвигателем мотор-редуктора 3 (см. рис. 6) осуществляет контроллер в функции рассогласования фактического и заданного положений рейки. Калибровка системы положения рейки проводится один раз в год.

При накатке резьбы передний конец изделия выходит из клетки, достигает переднего конца рейки и начинает ее сдвигать, воздействуя на датчик угловых перемещений. Контроллер ре-

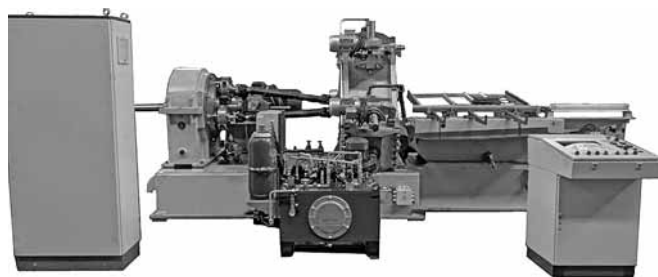


Рис. 7. Общий вид стана СХПРС 20-50



Рис. 8. Винты регулятора тормозных систем

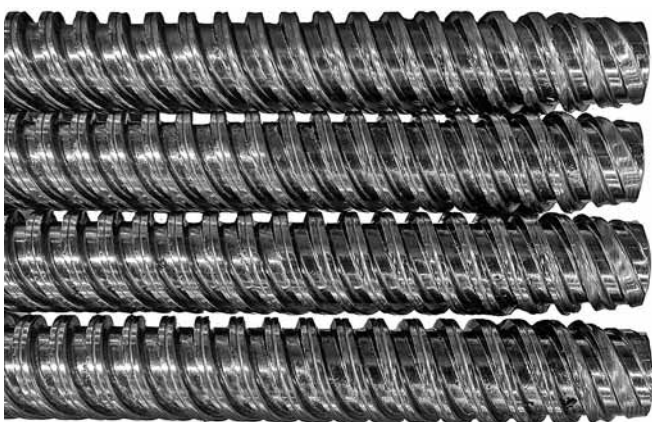


Рис. 9. Трапецеидальная резьба, полученная на стане СХПРС 20-50

гистрирует возникшее отклонение положения рейки и дает команду на разведение валков за счет перемещения гидроцилиндров, что ведет к прекращению накатки. Затем подается сигнал на перемещение рейки выталкивателя вперед, и прокатанное изделие выталкивается через валки в загрузочный желоб. Далее рейка возвращается в исходное положение, готовое изделие сбрасывается в карман, в загрузочный желоб падает новая заготовка, валки сводятся в рабочее положение, и начинается новый цикл накатки.

Стан СХПРС 20-50 (рис. 7) был спроектирован, изготовлен и внедрен в 2019 г. в АО "Транспневматика" (г. Первомайск), специализирующемся на изготовлении тормозных систем железнодорожных вагонов для ОАО "РЖД". На стане осуществляется изготовление более шести наименований винтов с резьбой СпТг 30×30(Р10) или СпТг 40×40(Р10) различной длины, в том числе и на изделиях, имеющих ступени (рис. 8 и 9). Переналадка стана на прокатку резьбы одного профиля, но другой длины занимает не более 2...3 мин.

Заключение. Разработан и внедрен трехвалковый резьбонакатной стан-автомат СХПРС 20-50 для осевой накатки резьбы заданной длины на валах диаметром 20...50 мм.

Стан позволяет осуществлять накатку резьбы на концах изделий, имеющих бурты.

Стан оснащен современной системой управления на базе программируемого контролера, что позволяет ему работать в автоматическом режиме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

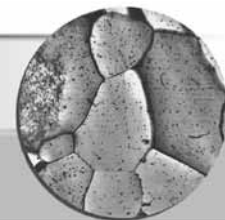
1. Якухин В.Г., Ставров В.А. Изготовление резьбы: справочник. М.: Машиностроение, 1989. 192 с.
2. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резьбонакатывание. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.
3. Специальные прокатные станы / А.И. Целиков, М.В. Барбарич, М.В. Васильчиков и др. М.: Металлургия, 1971. 336 с.
4. Пат. 2399454 Российская Федерация, МПК В21Н 3/02, В21Н 9/02, В23Г 7/02, В23Q 1/44. Стан для накатки наружных резьб / Васильковский Л.П., Котенок В.И., Трофименко Ю.Н., Катаева Т.Н.; заявл. 05.02.09, опубл. 20.09.10, Бюл. № 26.
5. Пат. 2408448 Российская Федерация, МПК В21Н 3/02, В21Н 9/02, В23Г 7/02, В23Q 1/44. Способ контроля длины накатки резьбы винта / Васильковский Л.П., Котенок В.И., Трофименко Ю.Н., Катаева Т.Н. Долгих Д.В.; заявл. 23.04.09, опубл. 10.01.11, Бюл. № 1.

*Владимир Иванович Котенок, д-р техн. наук,
shps140@mail.ru;*

Сергей Александрович Кузнецов, канд. техн. наук;

Сергей Александрович Берестнев;

Павел Николаевич Тугушев



УДК 669.295:539.374

DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-2-74-80

С.В. Путырский^{1, 2}, А.И. Плохих², А.Л. Яковлев¹

(¹ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов", г. Москва,
²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Исследование условий деформации многослойного материала методом конечно-элементного моделирования

Изучен метод конечно-элементного моделирования деформации многослойных материалов при горячей прокатке. Описаны физические условия, принятые при создании модели прокатки многослойного моделирования. Результаты расчетов показали особенности состояния очага деформации многослойного материала и торцов прокатываемого пакета. Показано, что прорабатываемость сечения достигается за счет особого напряженно-деформированного состояния, которое обеспечивается благодаря формированию неразрывной связи между слоями. Полученные результаты применимы для многослойных материалов на основе различных металлов.

Ключевые слова: многослойные материалы; горячая прокатка; деформация; моделирование; сталь; титановые сплавы; алюминиевые сплавы.

The finite element analysis method of multilayer materials deformation during hot rolling is studied. Physical conditions, on which the model is based, is described. Calculation results showed the multilayer materials center of deformation singularity and difference from condition of blank edge. It is shown that uniform deformation of multilayer material during hot rolling is possible due to formation of layer bonding. Described results are useful for multilayer materials on the base of different metals.

Keywords: multilayer materials; hot rolling; deformation; modeling; steel; titanium alloys; aluminum alloys.

Введение. Условия эксплуатации перспективных образцов техники определяют рост требований к свойствам конструкционных материалов. Традиционной является необходимость обеспечения сочетания высоких значений характеристик прочности и надежности материалов [1, 2]. Добиться качественно новых результатов в решении данной задачи, используя традиционные материалы, становится все более затруднительным. Актуальным вопросом является создание и применение принципиально новых материалов, обладающих уникальными свойствами [3–5].

Перспективный подход к проблеме создания материалов, сочетающих высокие значения характеристик прочности и надежности, — синтез многослойных материалов [6] со стабильной ламинарной структурой. Слои композиции выбирают из сплавов одного металла, например железа.

Особый интерес представляет создание многослойного материала на основе сплавов металлов, обладающих высокими удельными прочностными характеристиками [7, 8]. Отличительной особенностью технологии получения данных материалов является возможность достижения в компактной заготовке большого числа слоев, толщина которых в некоторых композициях достигает менее 800 нм. В отличие от би- и три-металлов, в которых слои зачастую носят различную функциональную нагрузку [9], в рассматриваемом классе материалов слои формируют монолит с ламинарной структурой, слои которого работают совместно. Известны также работы по созданию для микроэлектроники схожих материалов с большим числом слоев на основе сплавов разнородных металлов, например Cu—Nb [10].

В основу технологии синтеза многослойных материалов со стабильной ламинарной струк-

турой положено применение высокопроизводительного метода горячей пакетной прокатки. Особенность технологии получения многослойных материалов в том, что термомодеформационное воздействие осуществляется при условиях, когда составляющие исходной заготовки находятся в различных кристаллографических модификациях, что является одним из базовых принципов выбора композиций [11].

На рис. 1 представлены схемы выбора композиций на основе сталей, титановых и алюминиевых сплавов.

Другим базовым принципом является выбор составляющих композиции для минимизации выравнивающей диффузии легирующих элементов между слоями композиции [12]. В работах [11, 13, 14] показано, что в многослойных материалах со стабильной ламинарной структурой достигается сочетание свойств, присущее только данному классу материалов.

Стабильность получения требуемой структуры и достижения необходимого уровня свойств многослойных материалов во многом зависит от выбора параметров деформирования и достижения прорабатываемости сечения пакета. При выборе композиции также желательным

является обеспечение равных значений сопротивления деформации при температуре прокатки, но данный фактор не является ключевым.

В случае прокатки многослойного материала при температуре, при которой его составляющие находятся в различных кристаллографических модификациях и значения их механических свойств могут сильно различаться, возможна неравномерная прорабатываемость деформируемого пакета по толщине. Неравномерная деформация слоев может привести к их разрушению внутри пакета и заполнению места разрыва соседними слоями и, как следствие, к потере ламинарности строения многослойного материала [15]. Из-за неравномерного деформирования составляющих многослойного пакета на границах раздела между слоями возникают значительные касательные напряжения, которые могут привести к раскрытию пакета при прокатке, что является недопустимым. Возникновение значительных касательных напряжений на торцах прокатываемой заготовки также отмечено в исследованиях по ARB-технологии [16].

Эксперименты по получению многослойных материалов проводили на композициях,

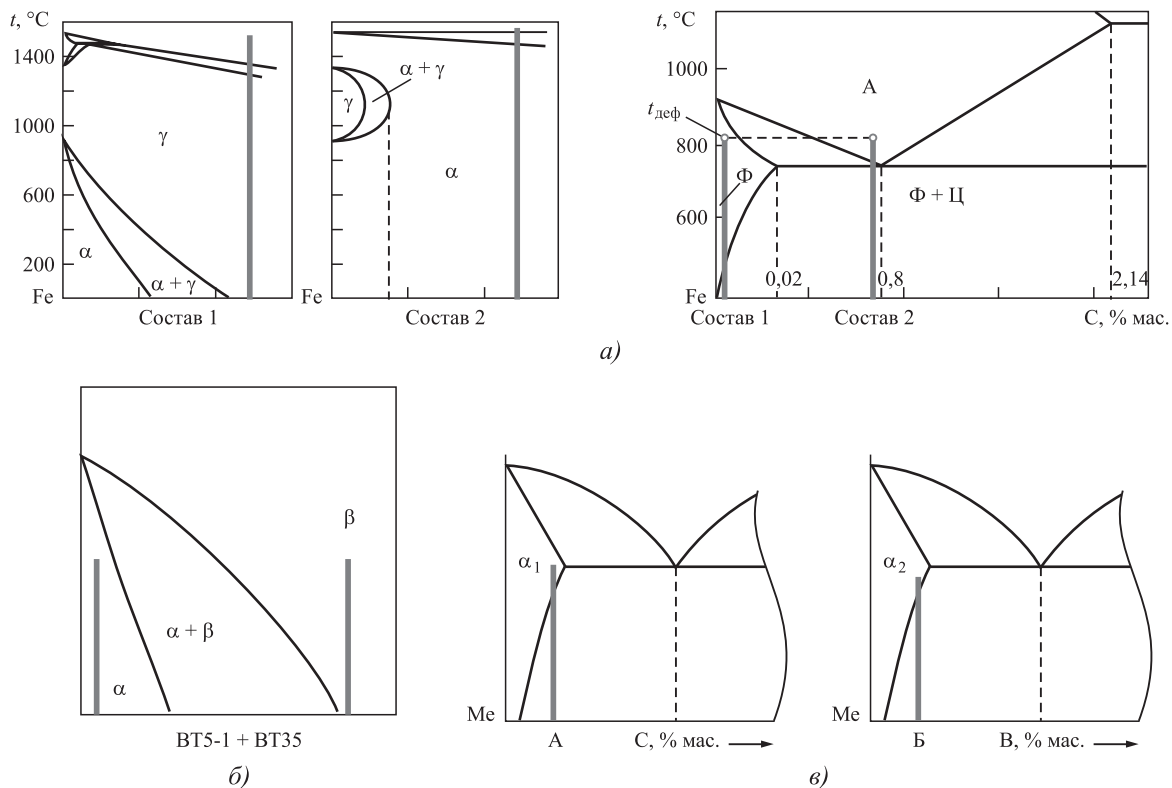


Рис. 1. Выбор композиций на основе сталей (а), титановых (б) и алюминиевых (в) сплавов

созданных на основе одного металла, с использованием различных сплавов. Исследовали многослойные материалы на основе сталей, титановых и алюминиевых сплавов. При этом формирование и наследование ламинарной структуры в многослойных материалах, а также характер изменения механических свойств подчиняются общим закономерностям.

Исследование процессов деформации многослойного пакета — сложная задача ввиду масштабного фактора — при реализации используемой технологии быстро достигаются малые толщины слоев, свойства которых по отдельности определить практически невозможно. Поэтому для выявления закономерностей, позволяющих получить ламинарную структуру многослойного материала при горячей прокатке, целесообразно использовать методы математического моделирования, реализованные в современных комплексах конечно-элементного анализа. Необходимым является рассмотрение вопроса о состоянии очага деформации многослойного материала при прокатке и факторов, позволяющих достичь необходимой прорабатываемости пакета по высоте.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 6.1. "Биметаллические материалы на основе алюминия, титана и бериллия" ("Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года") [3].

Материалы и методы исследования. Технологический маршрут изготовления листов многослойного материала с ламинарной структурой приведен на рис. 2. Он включает в себя подготовку поверхности заготовок, формирование многослойного пакета, горячую прокатку и резку полученного листа. После выполнения всех этапов цикл может быть повторен. Ключе-

вой этап технологии — многократная прокатка пакета до заданной толщины листа с определенной степенью деформации за проход.

Многослойные материалы с ламинарной структурой получали путем реализации приведенного технологического маршрута на композициях, составленных из сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Примеры структур полученных многослойных материалов на основе сталей, титановых и алюминиевых сплавов представлены на рис. 3.

Для анализа процесса деформации многослойной композиции использовали метод конечно-элементного моделирования, программ ANSYS и LS-Dyna, учитывая, что последняя была разработана для решения задач, предусматривающих значительные пластические деформации.

LS-Dyna предназначена для решения динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также связанных задач. LS-Dyna нашла широкое применение в таких отраслях науки и техники, как автомобилестроение (симуляция краш-тестов), военный промышленный комплекс (симуляция взрывов боеприпасов и их воздействие на окружающие предметы), авиа- и ракетостроение, для моделирования технологических процессов, в том числе деформационной обработки металлов.

Для создания расчетной модели и построения конечно-элементной сетки в работе использовали средства среды ANSYS Workbench и модуль Explicit Dynamics (LS-Dyna export), позволяющий создать командный файл, содержащий информацию о модели для запуска расчета. При создании модели прокатки каждый слой создавался независимо и затем объединялся в единую многослойную заготовку.

Это обеспечило возможность создания межслойной связи и назначения индивидуальных прочностных и пластических характеристик каждому слою.

Разработка расчетной модели. Важным моментом при создании модели прокатки многослойного материала является выбор подхода к моделированию связи между слоями композиции. Одним из возможных подходов является выбор и применение одного из

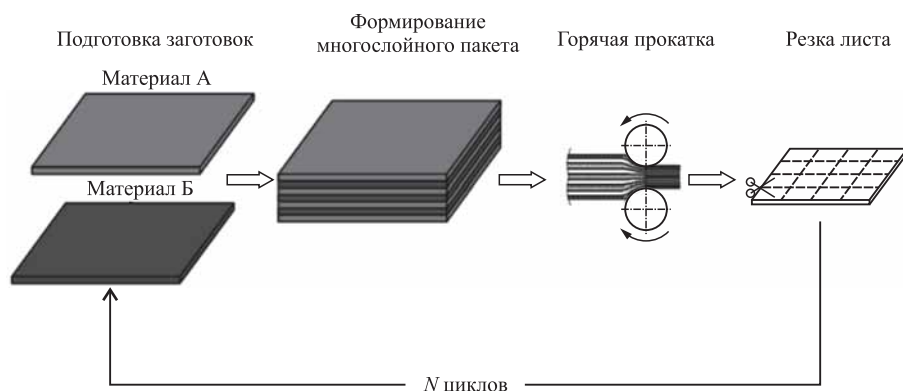


Рис. 2. Технологический маршрут изготовления листов многослойного материала

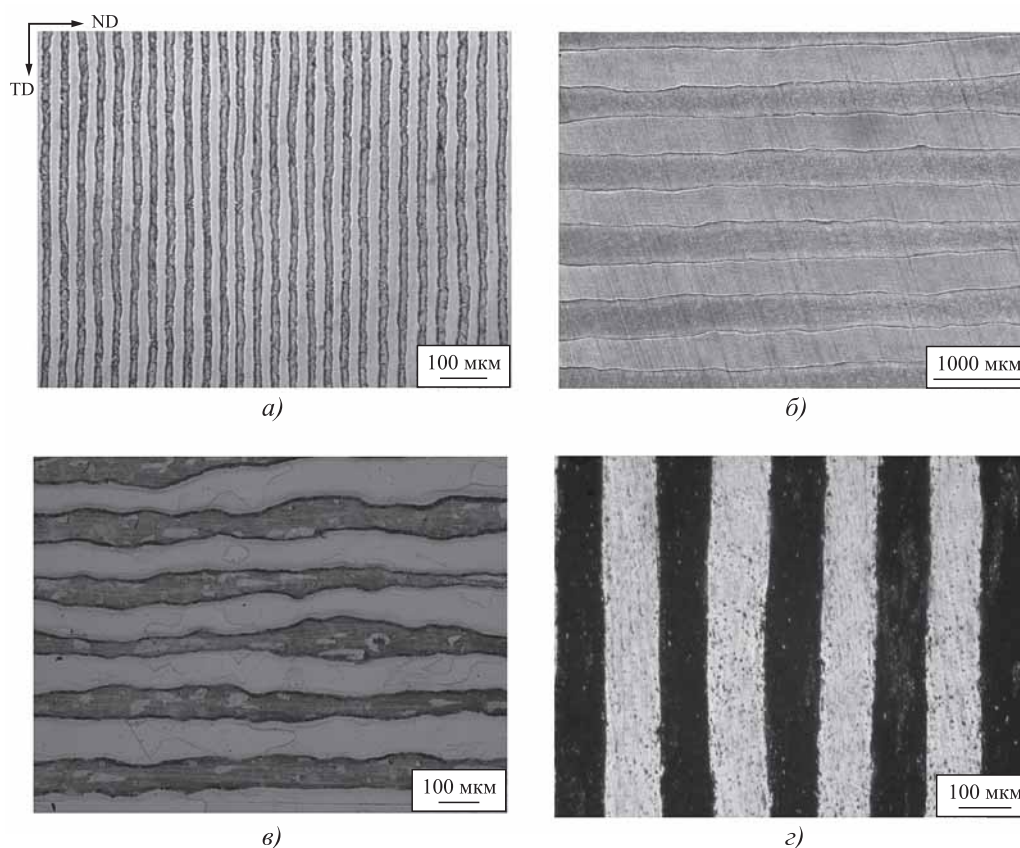


Рис. 3. Микроструктуры полученных многослойных материалов:

a — композиция 08X18H10 + 40X13; *б, в* — композиция VT5-1 + VT35 после прокатки до 10 и 2 мм соответственно; *г* — композиция на основе сплавов АМг и АМц

контактных алгоритмов, приведенных в базе программы [17, 18]. Этот подход требует подбора параметров для выбранного алгоритма, больших затрат аппаратных мощностей при выполнении расчета и не совсем полно отвечает физическим условиям задачи. Если учесть, что один из этапов разрабатываемой технологии — подготовка пакета, обеспечивающая прочное соединение слоев композиции, то можно представить связь между слоями неразрывной на всех этапах прокатки многослойного материала, что было принято за первое физическое условие моделирования. Наличие прочной связи в начале деформации во многом определяет получение ламинарной структуры многослойного материала.

Связь между слоями композиции была реализована за счет общих узлов на границе между соседними слоями, т.е. исключается взаимное проскальзывание слоев при прокатке. В реальности, в самом очаге деформации микросдвиги между слоями должны происходить из-за увеличения площадей контактирующих поверхностей. Поскольку этот участок ограничен не-

проскальзывающими друг относительно друга участками поверхностей слоев, находящимися вне очага деформации, то результирующее смещение между слоями в очаге принято равным нулю. Таким образом, в модели связь задана неразрывной на всем протяжении межслойной границы.

Другим физическим условием моделирования является предположение об отсутствии деформационного упрочнения слоев композиции. Для уменьшения вероятности потери ламинарности структуры материала при горячей прокатке пакет деформируется с малыми обжатиями за проход. Параметры прокатки выбраны таким образом, чтобы степень деформации заготовки не достигала критических значений, и не происходило образования на межслойной границе новых зерен, общих для двух соседних слоев. Рекристаллизация в этом случае должна идти по собирательному механизму, что приводит к росту зерен в плоскости слоя. Малая степень деформации и высокая температура прокатки способствуют прохождению рекристаллизационных процессов в динамическом режиме, что и позво-

ляет сделать допущение об отсутствии наклепа слоев композиции. Взаимосвязь механических свойств и параметров деформирования подробно рассмотрена в справочнике [19]. Предположение об отсутствии деформационного упрочнения слоев дает возможность выбрать для слоев упруго-пластическую модель их поведения (рис. 4).

Существующие представления о совместном деформировании разнородных материалов (см. кн.: Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. М.: Metallurgizdat, 1964. 680 с.) базируются на положении о необходимости достижения одинаковых значений прочностных и пластических характеристик в очаге деформации, но поскольку при выборе композиции это не единственный определяющий фактор, то значения пределов текучести в очаге деформации при прокатке будут различными.

Определение механических свойств отдельных слоев многослойных материалов является сложной задачей. Это обусловлено: малой толщиной слоев, постоянным изменением свойств при деформации в составе многослойного пакета, влиянием границ раздела между слоями на их сопротивление деформированию. Для выявления общих закономерностей деформации для многослойных материалов на основе различных металлов целесообразно задавать свойства слоев для удобства анализа и наглядности результатов расчетов.

Для упрощения расчета задача решена в плоской постановке, с выбором опции *plane-strain* (плоскодеформированное состояние) для плоских (SHELL) элементов. Таким образом, фактически рассмотрено продольное сечение прокатываемого пакета.

Общий вид разработанной модели прокатки многослойного материала представлен на рис. 5. Она состоит из многослойной заготовки, толкателя и прокатных валков. Валки и толкатель смоделированы недеформируемыми. Валки закреплены жестко.

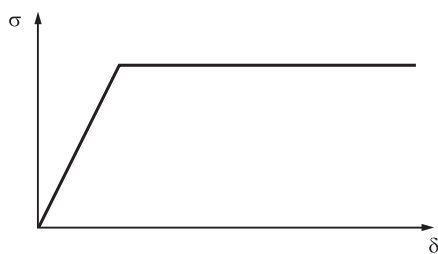


Рис. 4. Упругопластическая модель

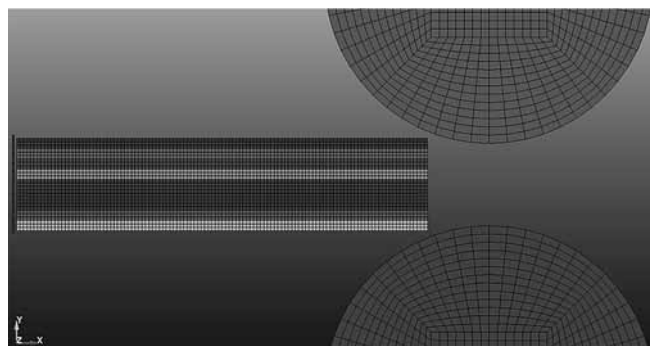


Рис. 5. Разработанная модель прокатки многослойного материала

Результаты расчетов. Ниже приведен анализ результатов расчетов созданной модели прокатки многослойного материала.

Как показано на рис. 6 (см. обложку), эквивалентные напряжения в слоях многослойной заготовки распределены неравномерно. В соответствии с принятой в качестве допущения упруго-пластической моделью деформации, напряжения в слоях достигают соответствующих пределов текучести и не увеличиваются из-за отсутствия возможности деформационного упрочнения.

Слой с более низким пределом текучести стремятся быть выдавленными из очага деформации. Если бы это происходило, то напряжения в более твердом материале не достигали предела текучести из-за слабого давления со стороны мягких слоев. Выдавливания мягкого материала не происходит, поскольку этому препятствует материал, находящийся вне очага, обеспечивая подпор. Возникновение подпора возможно в случае отсутствия взаимного проскальзывания слоев вне очага деформации, что наблюдается в модели при выбранном подходе к моделированию связи и в реальной заготовке за счет подготовки пакета, предшествующей прокатке. Подтверждением этому служат сжимающие напряжения, возникающие в слоях материала вне очага деформации. В очаге деформации все главные напряжения в элементе, соответствующем мягкому слою, являются сжимающими.

На рис. 7 представлены графики изменения напряжений по осям Ox , Oy и Oz для элемента, принадлежащего мягкому слою. При анализе результатов расчетов прокатки многослойных пакетов с соотношением пределов текучести 120...40 МПа, 120...70 МПа, 120...100 МПа выявлено, что независимо от разницы пределов текучести при деформации в мягком слое в направлении оси Oy возникают одинаковые по уровню напряжения, достаточные для создания

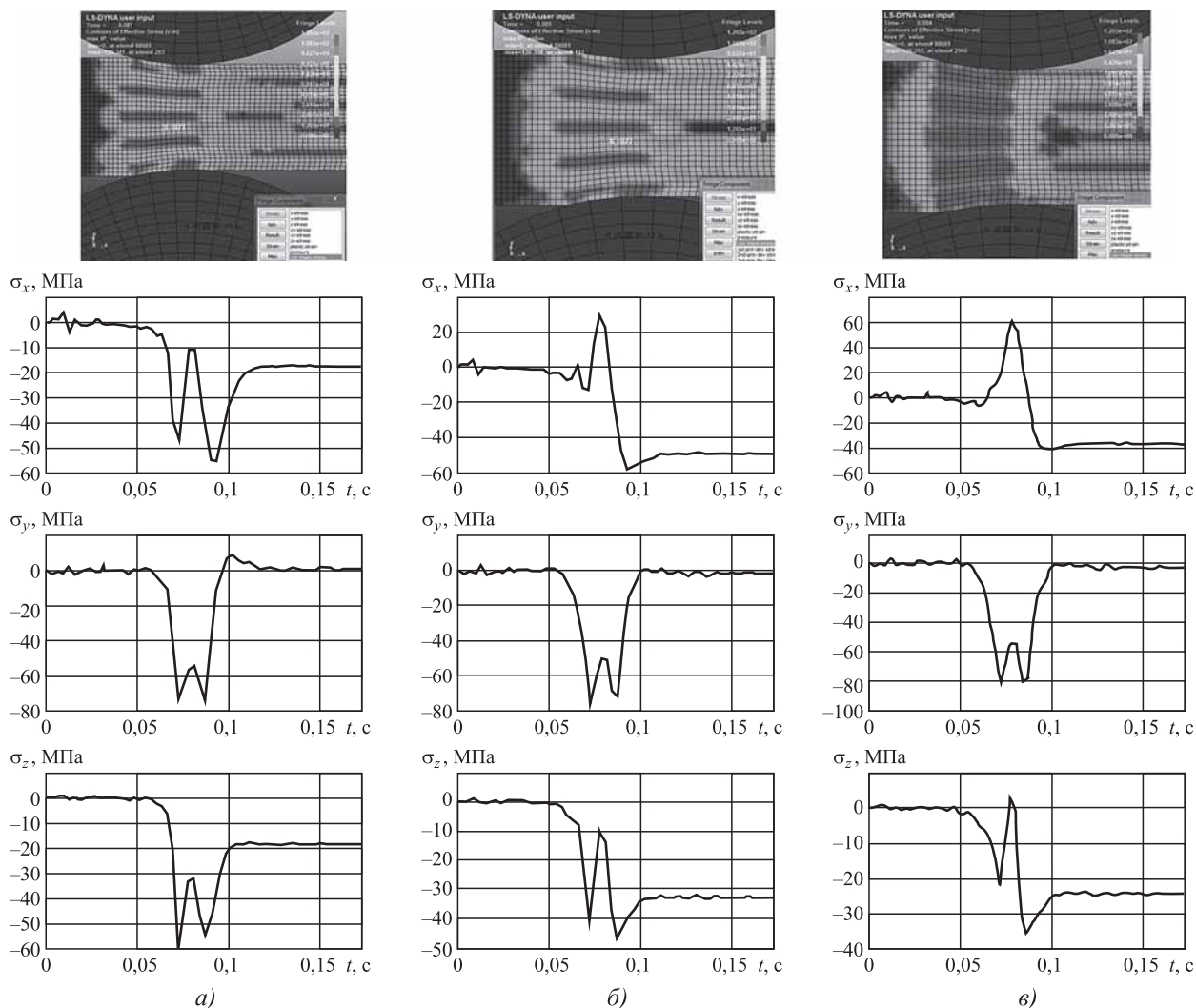


Рис. 7. Изменение напряжений в элементе, принадлежащем мягкому слою при прокатке композиций с различным соотношением пределов текучести слоев:
a — 120...40 МПа; *б* — 120...70 МПа; *в* — 120...100 МПа

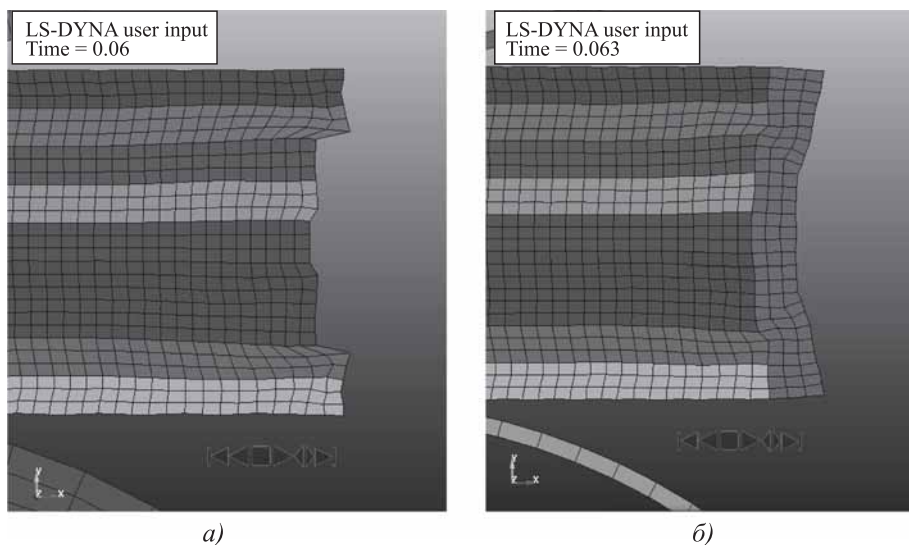


Рис. 8. Торцы многослойного материала после расчета прокатки:
a — без капсулы; *б* — с капсулой

силы, необходимой для деформации твердого слоя. В данном случае напряжения по оси *OY* достигают 80 МПа.

Описанное выше не выполняется для торцов многослойного пакета, так как обеспечение подпора там невозможно. При прокатке композиции, состоящей из слоев, обладающих значительной разницей значений пределов текучести, при расчете наблюдается неравномерность деформации на концах пакета (рис. 8, *a*). Дальнейшая прокатка в таком состоянии может привести к разрушению пакета. Сохранению пакета спо-

способствует его прокатка в капсуле. Модель, представленная на рис. 8, б, является упрощенной, на ней представлен только торцевой фрагмент капсулы, в которой осуществляется прокатка многослойного пакета на начальных этапах деформации. Наличие капсулы позволяет существенно снизить неравномерность деформации края пакета. Также при накоплении значительной разницы деформации слоев на торце заготовки торец может быть обрезан.

Заключение. На основании анализа результатов расчетов показано, что при прокатке многослойного материала, синтезируемого по рассматриваемой технологии, необходимое давление со стороны мягкого слоя на более твердый достигается в результате возникновения особого напряженного состояния мягкого слоя в очаге деформации. В этом случае мягкий слой в условиях его ограниченного течения находится в состоянии всестороннего сжатия, что обеспечивает возможность возникновения силы, необходимой для деформирования твердой составляющей композиции. Возникновение подобного состояния в очаге деформации при прокатке возможно в случае сплошного неразрывного соединения слоев в прокатываемом пакете, что обеспечивается на этапе предварительной подготовки пакета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Каблов Е.Н.** Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки — основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8—18.
2. **Каблов Е.Н.** Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. научно-информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. **Каблов Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ по реализации "Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года" // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520—530.
5. **Тарасов Ю.М., Антипов В.В.** Новые материалы ВИАМ — для перспективной авиационной техники производства ОАО "ОАК" // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 5—6.
6. **Колесников А.Г., Мечиев Ш.Т., Панова И.Ю.** Состояние и перспективы применения многослой-

ных металлических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 1. С. 42—43.

7. **Яковлев А.Л., Хорев А.И., Ночовная Н.А.** Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава BT23M // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 4. С. 8—13.

8. **Перспективы** использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах / А.А. Арисланов, Л.Ю. Гончарова, Н.А. Ночовная, В.А. Гончаров // Труды ВИАМ. 2015. № 10. Ст. 4. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.

9. **Кобелев А.Г., Лисак В.И., Чернышов В.Н. и др.** Производство слоистых композиционных материалов. М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. 496 с.

10. **Карпов М.И., Внуков В.И., Волков К.Г. и др.** Возможности метода вакуумной прокатки как способа получения многослойных композитов с нанометрическими толщинами слоев // Материаловедение. 2004. № 1. С. 48—53.

11. **Исследование** особенностей формирования субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки / А.Г. Колесников, А.И. Плохих, Ю.С. Комиссарчук, И.Ю. Михальцевич // МиТОМ. 2010. № 6. С. 44—49.

12. **Исследование** влияния диффузионной подвижности легирующих элементов на стабильность структуры многослойных металлических материалов / А.И. Плохих, Д.В. Власова, О.М. Ховова, В.М. Полянский // Наука и образование. 2011. № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/262116.html> (дата обращения: 26.11.2017).

13. **Плохих А.И., Путырский С.В.** Моделирование разрушения многослойных материалов в условиях одноосного растяжения / Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. материалов. 2015. С. 102—104.

14. **Разрушение.** В 2 кн. Кн. 2. Разрушение структур / М.А. Штремель. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 976 с.

15. **Прочность** сплавов. Часть II. Деформация: учебник для вузов / М.А. Штремель. М.: МИСиС, 1997. 527 с.

16. **Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials — Development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process** / Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai // Acta Mater. 1999. No. 47. P. 579—583.

17. **LS-Dyna** keyword user's manual. LSTC. URL: <https://www.lstc.com/download/manuals> (дата обращения: 15.08.2017).

18. **2007**, LS-Dyna theoretical manual. LSTC, 2006. URL: <https://www.lstc.com/download/manuals> (дата обращения: 15.08.2017).

19. **Целиков А.И., Томлёнов А.Д., Зюзин В.И. и др.** Теория прокатки: справочник. М.: Металлургия, 1982. 335 с.

*Станислав Владимирович Путырский;
Андрей Иванович Плохих, канд. техн. наук,
plokhikh@bmstu.ru;
Анатолий Львович Яковлев, канд. техн. наук*

А.М. Золотов, М.О. Смирнов

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого),
Т.А. Чижик (ПАО "Силовые машины", г. Санкт-Петербург)

Исследование механизма износа контактных поверхностей рабочих лопаток паровой турбины из титанового сплава ВТ6

Методами фрактографии, микрорентгеноспектрального и микроструктурного анализа и определения механических свойств исследованы контактные поверхности бандажных полок смежных рабочих лопаток паровой турбины из титанового сплава ВТ6 после эксплуатации. Проанализированы и объяснены различные виды разрушения контактных поверхностей. Показано, что причиной интенсивного истирания бандажных зацеплений турбинных лопаток является нарушение режима сварки в условиях станции.

Ключевые слова: турбинная лопатка; титановый сплав; растровая электронная микроскопия; микроструктура; фреттинг; усталость; паровая турбина.

The contact surfaces of the banding shelves of adjacent steam turbine blades made of titanium VT6 alloy after operation are studied by fractography, micro-X-ray and microstructural analysis and determination of mechanical properties. The different types of destruction of the contact surfaces are analyzed and explained. It is shown that the reason for intensive abrasion of the turbine blades' binding meshes is violation of the welding mode in the station conditions.

Keywords: turbine blade; titanium; alloy; raster electron microscopy; microstructure; fretting; fatigue; steam turbine.

Введение. Рабочие лопатки паровых турбин являются одними из наиболее ответственных деталей в турбоустановке. В быстроходных паровых турбинах (частота вращения ротора 3000 об/мин) для последних ступеней низкого давления нашли применение лопатки из титанового сплава ВТ6 (рис. 1) [1–3].

Условия обтекания лопаток последних ступеней в процессе работы турбины изменяются в широком диапазоне и избежать возмущаю-



Рис. 1. Ротор с установленными лопатками последней ступени из титанового сплава

щего воздействия потока пара на лопатки невозможно [4]. Конструктивно лопатки больших габаритных размеров имеют сложный профиль переменного сечения и значительный угол закрутки пера, что определяет большую изгибно-крутильную податливость лопаток и приводит к высоким уровням напряжений и вибраций. Для ограничения колебаний, вызванных воздействием потока, лопатки скреплены между собой специальными демпфирующими элементами — бандажными полками, которые образуют кольцо на периферии рабочего колеса (рис. 2).

Во время работы турбоустановки бандажные полки под действием центробежной силы



Рис. 2. Пример бандажного зацепления рабочих лопаток

стремятся развернуться, и между соседними лопатками образуется плотный контакт в зоне зацепления. При колебаниях лопаток в этих местах происходят проскальзывание и истирание. Таким образом, фреттинг бандажных полок в местах контакта является естественным следствием демпфирования колебаний лопаток. Явление фреттинга лопаток паровых турбин не так широко описано в литературе, как, например, усталость лопаток вследствие развития процессов коррозии, эрозии или нарушения режимов эксплуатации [5—8], так как рассматриваемый вид износа, как правило, имеет большой период развития и не успевает привести к серьезным повреждениям. Фреттинг более характерен для лопаток газотурбинных установок [9—14], где на материал лопаток воздействуют более высокие нагрузки и температуры.

В обычной практике для компенсации износа контактных поверхностей лопаток паровых турбин при плановых ремонтах устанавливаются уплотняющие вставки путем проведения ремонтной сварки в условиях станции. Технология подразумевает предварительную зачистку поверхности для удаления защитного покрытия, обезжиривание, установку и приварку уплотняющей вставки (Г-образная пластина из сплава титана) на место, где произошло истирание с последующей зачисткой выступающей части вставки заподлицо с бандажной полкой.

В настоящей работе рассмотрен случай интенсивного истирания бандажных зацеплений двух смежных лопаток уже после установки уплотняющей вставки, что не является характерным для турбинных лопаток этой конструкции.

Цель работы — исследование поверхности контакта смежных рабочих лопаток из сплава ВТ6 паровой турбины К-1000-60/3000 после эксплуатации и определение причин нехарактерного интенсивного истирания бандажных зацеплений.

Материал и методика исследования. Объект исследования — рабочая турбинная лопатка, на которой при вскрытии турбоагрегата, во время очередного планово-предупредительного ремонта (наработка турбины 12 835 ч), обнаружены интенсивный износ и отсутствие установленной ранее уплотняющей вставки между смежной парой с соответствующим образованием зазора и смещения. Контактные поверхности соседних лопаток имели нетипичные следы истирания и окисления. Температура эксплуатации

лопаток в турбине не претерпевала сильных колебаний и составляла ~80 °С. Отмечены неоднократные подъемы уровня вибрации на диафрагме, в которой установлена рассматриваемая лопатка, что происходило в силу превышения допустимых значений давления в конденсаторе при пусках, наборах мощности и номинальной нагрузке.

Лопатка изготовлена из титанового сплава ВТ6, % мас.: 6,5 Al; 4,7 V; 0,06 C; 0,05 Si; 0,004 Zr; 0,28 Fe; 0,171 O; 0,003 N; 0,002 H. Поверхность лопатки упрочнена методом ионной имплантации ионами азота с последующим покрытием нитридом титана.

Проведены механические испытания материала лопаток, измерена микротвердость. Микроповреждения исследованы на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV. Металлографические исследования металла лопаток при различных увеличениях выполнены с помощью электронного микроскопа Carl Zeiss. Механические свойства при испытаниях на статическое растяжение измерены на машине Zwick Roell, ударная вязкость — на копре ИО 5003-0,3-11.

Зоны вырезки образцов для исследования механических свойств и микроструктуры лопатки: бандажная полка — поперечное направление, продольное и поперечное направления в замковой части и продольное направление на первой части в двух местах по высоте.

Результаты исследований и их обсуждение. Установлено, что износ контактной поверхности несущего зуба не превышает 1 мм. У корня несущего зуба наблюдается образование характерных ступенек от контакта смежных полок, что свидетельствует о повышенных нагрузках вследствие вибрации в условиях нерасчетного сопряжения бандажных полок. Визуально заметно наличие эрозионного износа по отдельным внутренним поверхностям зубьев бандажной полки, что указывает на воздействие рабочего потока. Следовательно, лопатка продолжительное время (3000..4000 ч) работала при отсутствии вставки и смещении контактных поверхностей, что приводит к повышенному давлению на кромку зуба со стороны контактной поверхности.

Микроструктуры в зоне сварки и зоне термического влияния представлены на рис. 3 по мере удаления от изношенной контактной поверхности вглубь бандажной полки.

Виден переход микроструктуры от зоны перемешивания основного металла с материалом уплотняющей вставки или сварочной проволоки (непротравленный участок) к области с основной структурой тела лопатки. Участков альфированного слоя на поверхностях износа не обнаружено.

Для детального наблюдения за изменением микроструктуры лопатки в процессе эксплуатации сравнивали структуры в отработанной лопатке и штампованной заготовке лопатки, которая имеет идентичные метод изготовления и химический состав (рис. 4). Микроструктуру анализировали на расстоянии 125 мм от бандажной полки в поперечном направлении, поскольку это сечение является наиболее тонким в штампованной заготовке и исследуемой лопатке.

Микроструктура основного металла лопаток состоит из равноосных зерен первичной α -фазы в пластинчатой ($\alpha + \beta$)-матрице, отвечает 2-му типу шкалы микроструктур № 1 ОСТ 1 90002—86, что характерно для турбинных лопаток из титанового сплава ВТ6, прошедших многопереходную штамповку ниже ($\alpha + \beta$)-перехода и термическую обработку по режиму двухступенчатого отжига [15—18].

Однако параметры фаз в материале лопатки после эксплуатации отличны от типичных, получаемых после штамповки и термической обработки. Например, ширина ламелей α -фазы и прослоек β -фазы в несколько раз меньше в рассматриваемой лопатке; также содержание и диаметр включений первичной α -фазы меньше, что уменьшает сопротивление усталости сплава.

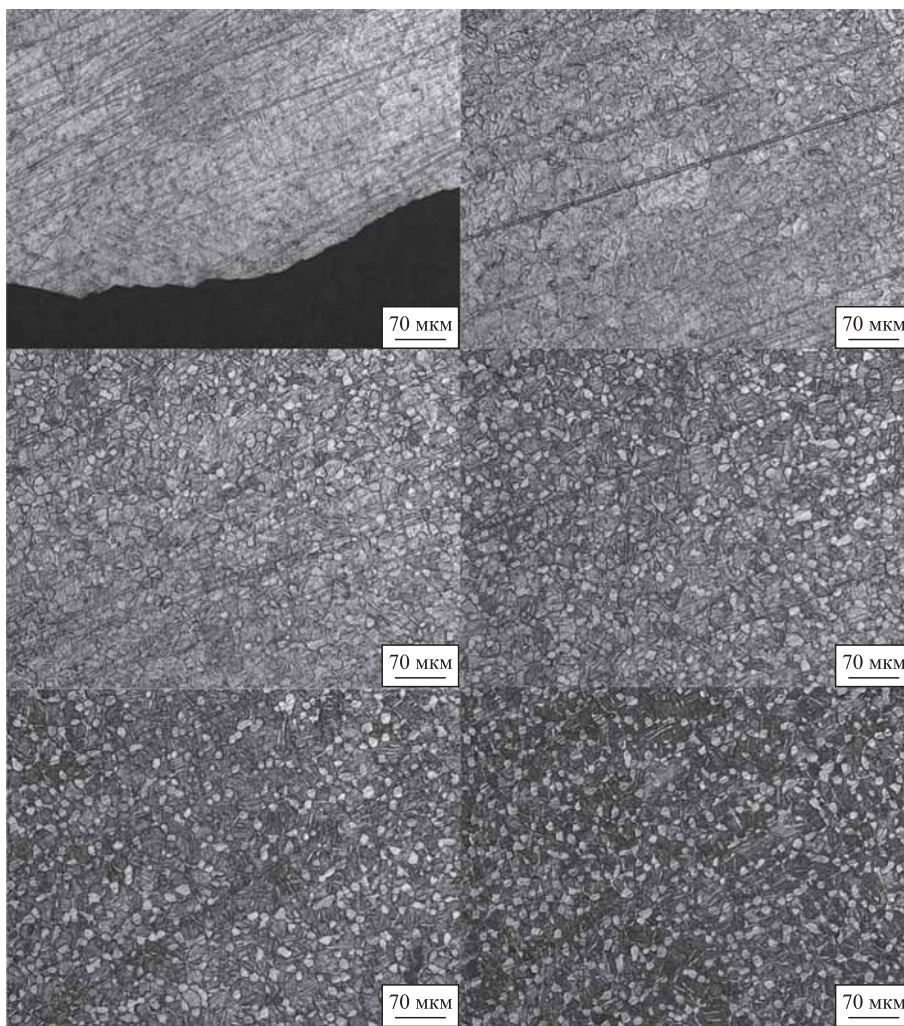


Рис. 3. Микроструктуры материала бандажной полки по мере удаления от зоны перемешивания при сварке (слева направо)

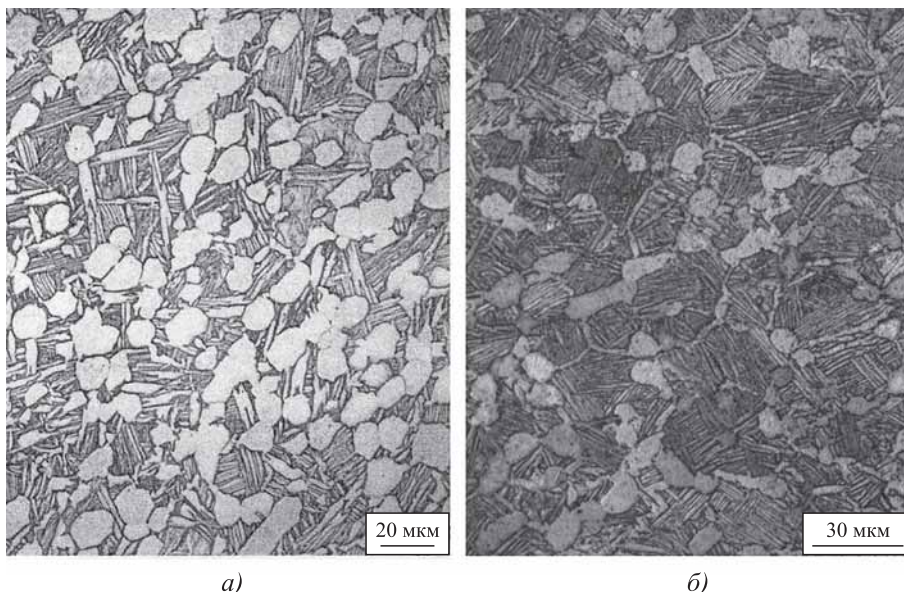


Рис. 4. Микроструктуры основного металла лопатки:

a — в штампованной заготовке; *б* — в исследуемой турбинной лопатке после эксплуатации

Фрактографический анализ показал, что на контактных поверхностях зубьев полок присутствуют множественные каверны и лунки фреттинг-коррозии, покрытые оксидами и вторичными продуктами трения (рис. 5 и 6). Форма образовавшихся лунок — преимущественно округлая, вытянутая в направлении трения, с размерами 1,0...1,5 мм. Именно твердые частицы оксидов, взаимодействуя с поверхностью контакта сопряженных деталей, могут образовать на них каверны [19, 20]. Причем фреттинг может наблюдаться при очень малых перемещениях, диапазон амплитуд для разных материалов может быть от 3...10 нм до 500...1000 мкм [21, 22].

Разрушение материала в области фреттинга носит преимущественно коррозионно-усталостный характер, поскольку в процессе трения в местах контакта происходит образование характерных для фреттинг-коррозии оксидов и их хрупкое разрушение с образованием микротрещин [23].

Микрорентгеноспектральный анализ вторичных продуктов износа в области фреттинг-коррозии показал, что основными химическими элементами, присутствующими в оксидах на контактных поверхностях, являются: до 83,8 % Ti; до 69,1 % Fe; до 7,5 % Si; до 5,8 % Mg; до 4,8 % Al; до 4,2 % V; до 2,0 % Zn. Химические

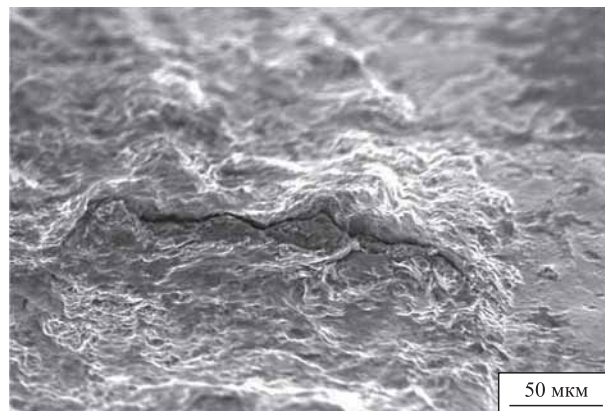


Рис. 6. Единичная трещина в материале оксидов на поверхности

элементы, не входящие в сплав лопатки (Fe, Si, Mg, Zn), вероятно, попали в зону трения в процессе эксплуатации турбины (рис. 7).

На лопатке с внутренней стороны бандажной полки на зубе имеются остатки наплавки, выполненной при закреплении уплотняющей вставки, а также наплавка по защитному нитридному покрытию, переходящая на вершину зуба.

При оптическом наблюдении на рис. 8 (см. обложку) видны два самостоятельных разрушенных участка сварки, каждый с образованием "короны" с выраженным характером излома с ручьистостью. На обоих участках хорошо видны круговые окисные цвета побегалости, дендритное строение, рекристаллизованные зерна различного размера. В зоне разрушения большое количество трещин, вырывов, сколов, отрывов, выкрашиваний. "Корона", находящаяся ближе к вершине зуба, слегка нависает над кромкой контактной поверхности (см. рис. 8, а), что, вероятно, и послужило причиной разрушения двух сварных участков при трении контактных поверхностей с задеванием наплавленных хрупких участков.

Ближе к вершине зуба — третий участок сварки (наплавки) на его нерабочую часть. Выявлено, что проведение сварки осуществлено только с частичной зачисткой

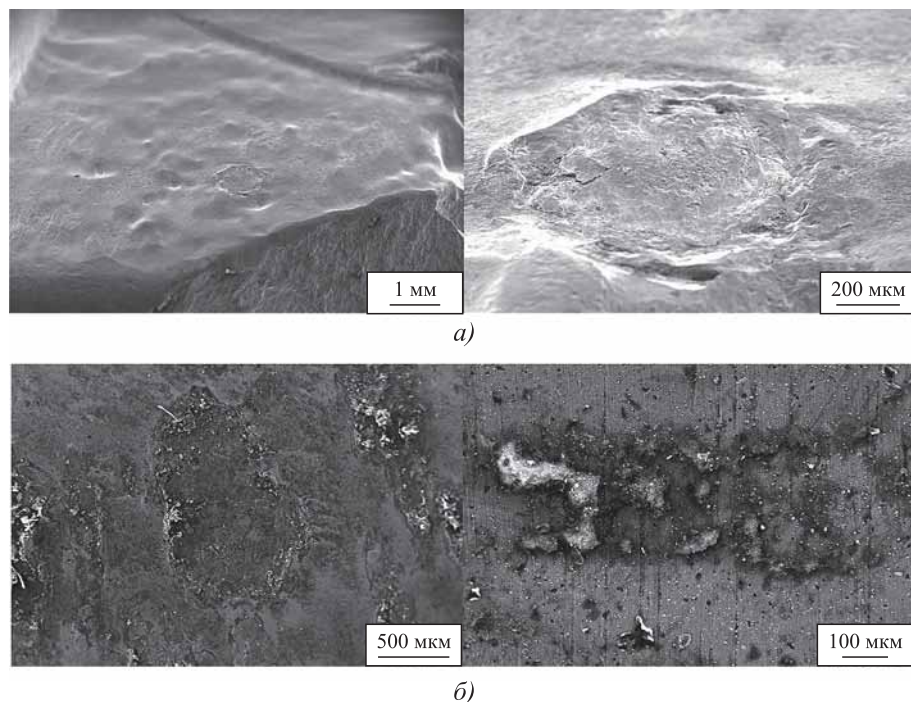
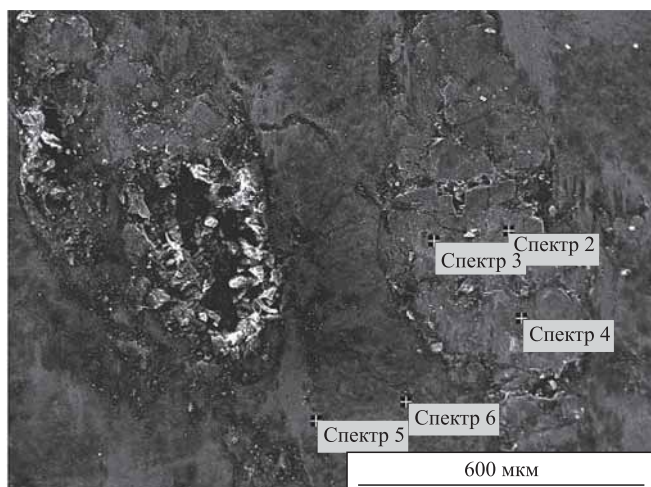
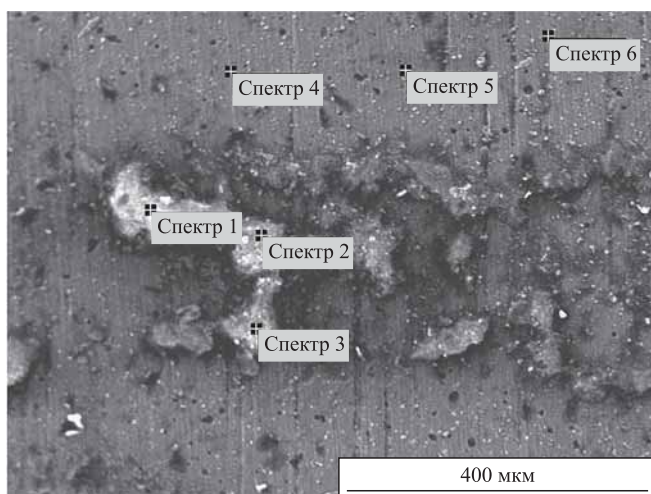


Рис. 5. Каверна (а) и оксиды (б) фреттинг-коррозии на поверхности



Номер спектра	Массовая доля элементов, %									
	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Fe	Zn	Итого
1	31,75	—	3,55	1,29	1,03	55,08	3,02	3,91	3,91	100
2	25,04	0,73	3,24	1,91	3,42	43,49	2,41	2,41	19,75	
3	36,37	0,72	3,40	2,36	8,42	40,16	2,24	2,24	6,34	
4	29,02	0,91	3,99	2,99	3,34	41,80	1,79	1,79	16,16	
5	20,84	0,32	4,80	0,56	0,57	65,98	4,26	4,26	2,68	
6	21,03	—	4,42	0,27	0,27	69,29	3,68	3,68	1,04	
Максимальное значение	36,37	0,91	4,80	2,99	8,42		4,26	4,26	19,75	—
Минимальное значение	20,84	0,32	3,24	0,27	0,26	40,16	1,79	1,79	1,04	—

а)



Номер спектра	Массовая доля элементов, %										
	N	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Zn	Итого
1	—	26,34	1,46	5,84	1,45	7,50	0,51	8,55	48,35	—	100
2	—	18,35	—	1,92	0,81	2,09	0,95	4,08	69,16	2,01	
3	—		1,39	4,46	1,40	5,95	0,78	4,14	61,90	1,64	
4	18,54	—	—	—	—	—	—	81,46	—	—	
5	—	16,65	0,74	—	1,62	0,38	—	79,67	0,94	—	
6	16,19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Максимальное значение	18,54	26,34	1,46	5,84	1,62	7,50	0,95	83,81	69,16	2,01	—
Минимальное значение	16,19	16,65	0,74	1,92	0,81	0,38	0,51	4,08	0,94	1,64	—

б)

Рис. 7. Расположение участков микроанализа в центральной части (а) и вблизи края (б) поверхности бандажного зацепления

защитного покрытия и с формированием зоны термического влияния непосредственно по покрытию. Эта зона также имеет цвета побежалости, дендритную и рекристаллизованную структуру в результате сварки.

На рис. 9, а можно наблюдать крупнозернистую рекристаллизованную структуру, обладающую пониженным комплексом механических свойств, а на рис. 9, б — дендритные кристаллы.

Химический состав материала наплавки приведен в таблице к рис. 10 и характеризует перемешивание сварочного материала и основного материала. В зоне наплавки непосредственно по защитному покрытию имеется растрескивание до основного материала, а также вспучивание и оплавление нитридного покрытия с образованием пористости (см. рис. 10).

Химический состав материала наплавки не соответствует сварочному материалу вставок, применяемых для ремонта, что указывает на проведение сварки с перемешиванием основного материала лопатки с материалом сварочной проволоки и покрытия с использованием некачественной или непредусмотренной действующей инструкцией сварочной проволоки. Микротвердость в зоне сварки достигает 450...500 HV 0,05, а основного металла 340...360 HV 0,05. Очевидно проведение некачественной приварки уплотняющих вставок.

В табл. 1 представлены механические свойства исследуемой лопатки, полученные в поперечном направлении на технологическом припуске после штамповки и на бандажной полке после наработки в турбине. Технологический припуск в штампованных заготовках заложен также в бандажной части, таким образом, представлены данные из аналогичных зон вырезки

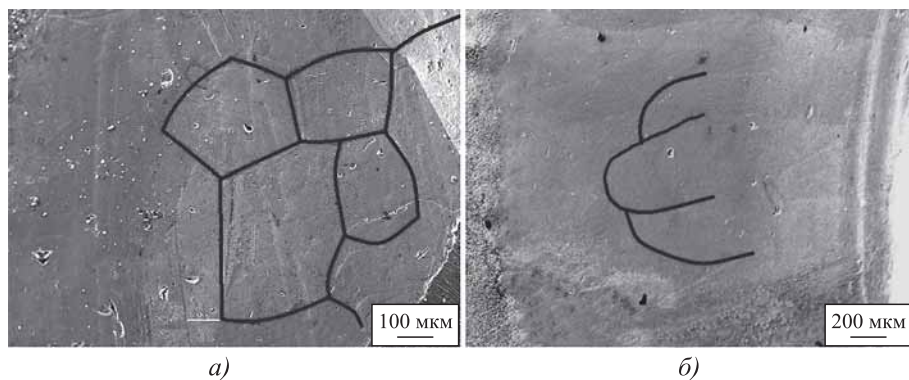
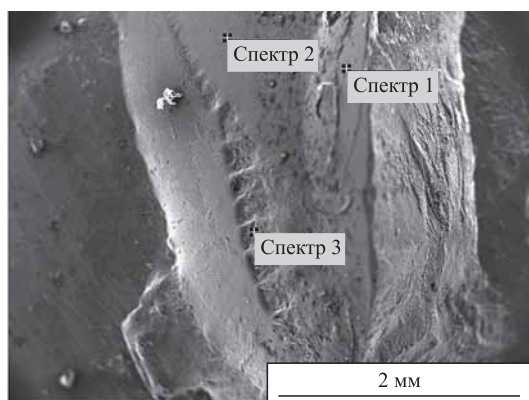


Рис. 9. Микроструктуры в зоне наплавки:

а — рекристаллизованные зерна; б — дендритные кристаллы



Номер спектра	Массовая доля элементов, %										
	С	О	Al	Si	S	Cl	Ca	Ti	Cr	Fe	Итого
1	—	14,86	4,60	0,41	0,55	0,98	0,54	76,91	0,62	0,54	100
2	7,39	31,31	2,21	—	0,33	—	—	55,35	0,46	2,94	
3	—	—	0,76	—	—	0,78	—	56,19	—	2,07	
Максимальное значение	7,39	38,70	4,60	0,76	0,55	0,98	0,74	76,91	0,62	2,94	—
Минимальное значение		14,86	0,76		0,33	0,78		0,54	55,35	0,46	

Рис. 10. Схема микрорентгеноспектрального анализа материала наплавки

образцов до и после эксплуатации конкретной рассматриваемой лопатки.

Получены высокие значения ударной вязкости: 54 и 60 Дж/см² (см. табл. 1). Согласно статистике среднее значение KCU для таких лопаток составляет 46 Дж/см². Выявлено повышение предела текучести при менее заметном

увеличении предела прочности. Известно, что для лопаток различных плавков стандартное соотношение пределов текучести и прочности $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ в лопатках из данного сплава варьируется в зависимости от зоны вырезки образцов от 0,83 до 0,90, но в единичных случаях (в зоне пера) может достигать до 0,92, что объясняется высокой степенью деформации в тонком сечении при штамповке.

Для исследуемой лопатки соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ изначально, после штамповки и термической обработки, находилось на предельном уровне, причем в зоне бандажа заготовки, что свидетельствует о высоких остаточных напряжениях, из-за релаксации которых, вероятно, и произошло первое истирание. Таким образом, закритические нагрузки на лопатки (отклонение от нормальных режимов эксплуатации турбоагрегата) и релаксация высокого уровня внутренних и поверхностных остаточных напряжений привели к развороту профиля пера и, как следствие, к более интенсивному истиранию бандажных зацеплений с постепенным образованием зазора из-за контакта под высоким давлением. По этой причине и была установлена уплотняющая вставка во время предыдущего планово-преду-

предительного ремонта. Предположительно исходный высокий уровень свойств в штампованной заготовке лопатки обусловлен неполным протеканием рекристаллизационного отжига первой ступени после штамповки.

После всего периода эксплуатации (до и после установки вставки) значение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$

1. Механические свойства исследуемой лопатки

Участок определения свойств	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$\sigma_B - \sigma_{0,2}$, МПа	δ	ψ	KCU, Дж/см ²	HB
	МПа				%			
Технологический припуск	889	966	0,92	65	15,7	47,3	54	300
Бандажная полка	943	990	0,95	47	17	46	60	311

в зоне бандажа увеличилось до 0,95, что свидетельствует об уменьшении резерва пластичности материала лопатки в результате циклических нагрузок и вибраций. Исследованы механические свойства основного тела (перо, замок) лопатки после эксплуатации, они соответствуют техническим требованиям и также находятся на завышенном для турбинных лопаток из сплава ВТ6 уровне, а соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, как и в случае бандажа, превышает верхний предел.

Известно, что там, где вызывающее фреттинг движение возникает из-за циклического нагружения одной из соприкасающихся деталей, фреттинг дает начало образованию усталостных трещин [24]. У титановых сплавов отмечена максимальная повреждаемость фреттинг-усталостью по сравнению со сталями и никелевыми сплавами. Стоит также отметить известный факт, что при локальном влиянии сварки на тело лопаток из титанового сплава (при восстановлении входных кромок) сопротивление усталости может быть на уровне 180 МПа, в то время как сопротивление усталости сплава ВТ6 для лопаток турбин должно быть не менее 410...450 МПа [3].

При исследовании обнаружены мелкие подповерхностные трещины от истирания глубиной распространения до 40 мкм. Также присутствуют межкристаллитные подповерхностные трещины, идущие от поверхности износа, максимальная зафиксированная протяженность 1600 мкм (рис. 10). На поверхности перемешанного слоя материала зафиксированы поверхностные усталостные трещины, которые образованы под углом 45° к внутренней поверхности бандажа, что указывает на совместное действие на зуб лопатки остаточных растягивающих напряжений от сварки и рабочих механических напряжений. Подобные трещины можно наблюдать на гребнях резьбы болтов из сплава Ti—6Al—4V (аналог ВТ6), схема работы и зацепления которых конструктивно схожа с эвольвентой бандажной полки лопатки [23]. Расположение трещин под углом к поверхности износа с последующим образованием от них сколов и их разветвленность также свидетельствуют о наличии явления фреттинг-усталости [25].

Следует отметить разветвленный извилистый характер распространения трещин в изломе сплава. Присутствуют характерное межкристаллитное распространение трещины

и транскристаллитное, когда трещина проходит через частицы глобулярной α -фазы (рис. 11, б). Отклонение трещины от первоначальной траектории минимально, что обусловлено размером первичной α -фазы 15...20 мкм и косвенно свидетельствует о незначительном изменении скорости ее распространения.

Присутствует частая остановка развития или блокировка трещины на больших расстояниях от поверхности. Возникновение бифуркации трещины может свидетельствовать о переходе от одной стадии ее развития к другой, первый переход трещины происходит на расстоянии 500...600 мкм. Подобное явление в сплаве Ti—6Al—4V с бимодальной структурой описано в работе [26]. Однако в рассматриваемом случае данные бифуркации замечены до конца трещины, что, вероятно, обусловлено непостоянством возникновения критических напряжений в лопатке (присутствуют пики вибрации при эксплуатации турбоагрегата).

Заключение. Ненормированное сопряжение лопаток при работе и, как следствие, действие повышенных нагрузок в области трения привели к механическому истиранию, фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости на контактных поверхностях зубьев, между которыми была установлена уплотняющая вставка. Об этом свидетельствуют характерные повреждения в виде оксидов, усталостных трещин, язв и каверн фреттинга на площадке износа. Расположение трещин под углом к поверхности износа, их разветвленность также указывают на развитие усталостных процессов. Зафиксированы изменения механических свойств до и после эксплуатации в бандажной зоне: повышение предела текучести при менее заметном увеличении предела прочности, повышение ударной вязкости и соотношения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ до 0,95. Это подтверждает постепенное исчерпание резерва длительной пластичности лопатки.

Повышенный износ бандажных зацеплений лопаток произошел из-за нерасчетного сцепления контактных поверхностей в результате отрыва уплотняющей вставки. Вырыв вставки произошел по причине охрупчивания материала после проведения сварки, о чем свидетельствует наличие зоны перемешивания основного металла с материалом уплотняющей вставки или сварочной проволоки (непротравленный участок) и значения микротвердости в зоне сварки 450...500 НВ.

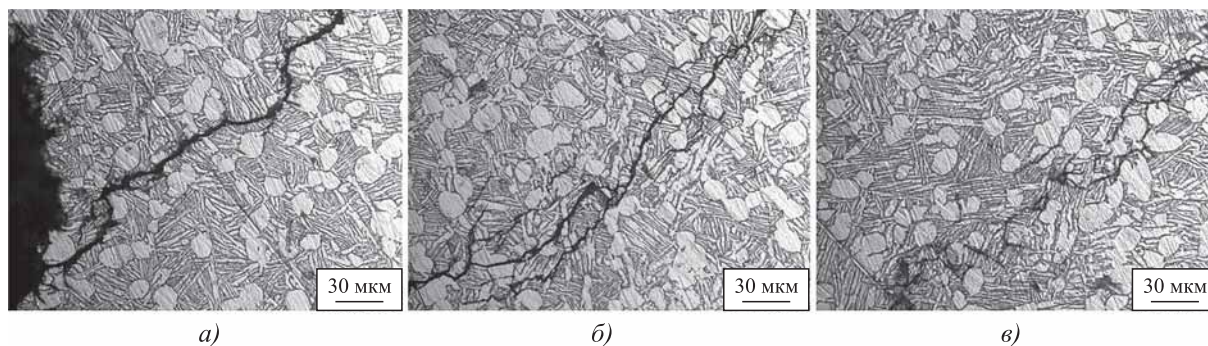


Рис. 11. Усталостная трещина на контактной поверхности:

a — начало трещины; *б* — 600...900 мкм от поверхности; *в* — 920...1160 мкм от поверхности

Таким образом, основной причиной нехарактерного интенсивного истирания бандажных зацеплений смежных рабочих лопаток паровой турбины К-1000-60/3000 из сплава ВТ6 является некачественная ремонтная сварка, выполненная в условиях станции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Avcu E., Fidan S., Yıldırım Y., Sınmazçelik T.** Solid particle erosion behaviour of Ti6Al4V alloy // *Tribology — Materials Surfaces & Interfaces*. 2013. 7 (4). P. 201—210.
2. **Yuqing Shi, Yixin Liu, Xiao Li, Yong Zhang.** Effect of Ultrasonic Surface Rolling Process on Solid Particles Erosion Performance of Ti—6Al—4V. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018. 394 (3): 032058.
3. **Investigation** of the Fatigue and Short-Term Mechanical Properties of 13 % Chromium Steel and Titanium Alloys after Welding or Treatment with High-Frequency Currents as Applied to Steam-Turbine Blades / F.G. Gonserovskii, V.I. Nikitin, V.M. Silevich, O.N. Simin // *Thermal Engineering*. 2008. Vol. 5. No. 2. P. 149—153.
4. **Mazur Z., Hernández-Rossette A., García-Illescas R.** Investigation of the failure of the L-0 blades // *Engineering Failure Analysis*. 2006. Vol. 13. Iss. 8. P. 1338—1350.
5. **Bhagi Loveleen Kumar, Gupta Pardeep, Rastogi Vikas.** Fractographic investigations of the failure of L-1 low pressure steam turbine blade // *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2013. 1 (2). P. 72—78.
6. **Mann B.S., Arya Vivek, Pant B.K.** Influence of Laser Power on the Hardening of Ti6Al4V Low-Pressure Steam Turbine Blade Material for Enhancing Water Droplet Erosion Resistance // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2011. Vol. 20. Iss. 2. P. 213—218.
7. **Goutam Das, Sandip Ghosh Chowdhury, Ashok Kumar Ray et al.** Turbine blade failure in a thermal power plant // *Engineering Failure Analysis*. 2003. 10 (1). 85—91.
8. **Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Оленин М.И.** Повышение сопротивляемости разрушению сталей перлитного класса за счет микро- и наноструктурной трансформации карбидной фазы при дополнительном отпуске // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013. № 2. С. 42—48.
9. **Failure** characterisation of Ti6Al4V gas turbine compressor blades / A. Kermanpur, H. Sepehri Amin, S. Ziaei Rad, N. Nourbakhshnia // *Engineering Failure Analysis*. 2008. 15 (8). 1052—1064.
10. **Fretting** Fatigue Improvement of Ti6Al4V by Coating and Shot Peening / Daoxin Liu, Xiaodong Zhv, Bin Tang, Jiawen He // *J. Mater. Sci. Technol.* 2005. Vol. 21. No. 2. P. 246—250.
11. **Романовский Б.В. и др.** Фреттингостойкость деталей машин: учебное пособие. Пенза: Изд-во Пензенского политехн. ин-та, 1992. 72 с.
12. **Фукс М.Д., Зеленин Ю.В., Кондратьев С.Ю.** Исследование качества металла толстостенных труб из коррозионно-стойких сталей // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 2. С. 36—38.
13. **Попов В.О., Кондратьев С.Ю.** Упрочнение титановых сплавов методом лазерного оксидирования // *РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. 2013. № 4 (82). С. 106—110.
14. **Горынин В., Кондратьев С., Попов В.** Лазерное модифицирование трибологических свойств сталей и цветных сплавов // *Фотоника*. 2010. № 3 (21). С. 26—33.
15. **Золотов А.М., Чижик Т.А., Смирнов М.О.** Построение диаграмм рекристаллизации третьего рода титанового сплава ВТ6 // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Том 23. № 4. 118—126 с.
16. **Ночовная Н.А.** Исследование влияния параметров изотермической деформации и термической обработки на структуру и механические свойства штамповки из сплава ВТ6ч // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10 (58). С. 3.
17. **Gammon L.M., Briggs R.D., Packard J.M. et al.** Metallography and Microstructures of Titanium and Its

Alloys // Metallography and Microstructures. 2004. Vol. 9. P. 899–917.

18. **Кондратьева О.В., Кондратьев С.Ю., Швецов О.В.** Исследование режимов упрочняющей термической обработки титанового сплава BT23 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 11 (761). С. 28–35.

19. **Петухов А.Н.** Соппротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.

20. **Fretting wear behaviour of plasma nitrided Ti–6Al–4V fretted against unnitrided Ti–6Al–4V and alumina counterbodies** / M. Mubarak Ali, S. Ganesh Sundara Raman, S.D. Pathak, R. Gnanamoorthy // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2009. Vol. 62. Iss. 1. P. 59–64.

21. **Поляков К.А., Клебанов Я.М., Ремнев В.В. и др.** Моделирование нагрузок на элементы вооружения буровых шарошечных долот // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2008. № 9. С 10–11.

22. **Артёмов И.И., Кривчик В.Д.** Дислокационная модель фреттинг-усталости в условиях вибрационного нагружения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2004. № 5. С. 42–45.

23. **Venkatesh T.A., Conner B.P., Suresh S. et al.** An experimental investigation of fretting fatigue in Ti–6Al–4V: the role of contact conditions and microstructure // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32. Iss. 5. P. 1131–1146.

24. **Уотерхауз Р.Б.** Фреттинг-коррозия. Ленинград: Машиностроение, 1976. 272 с.

25. **Halil I. Yuksel.** Effects of Shot-Peening on High Cycle Fretting Fatigue Behavior of Ti–6Al–4V // *Journal of Aeronautics and Space Technologies*. 2003. Vol. 1. No. 1. P. 51–64.

26. **Benedetti M., Fontanari V.** The role of bi-modal and lamellar microstructures of Ti–6Al–4V on the behavior of fatigue cracks emanating from edge-notches // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2004. 27 (11). P. 1073–1089.

Александр Максимович Золотов, д-р техн. наук;

Максим Олегович Смирнов,

smirnov_mo@mail.ru;

Татьяна Александровна Чижик, канд. техн. наук



23 января 2021 г. исполнилось 60 лет

Андрею Ивановичу Плохих,

кандидату технических наук, доценту, руководителю Учебного демонстрационного испытательного центра Научно-учебного комплекса "Машиностроительные технологии" и заведующему лабораторией "Прочность конструкционных материалов" МГТУ им. Н.Э. Баумана, известному специалисту в области высокопрочных

конструкционных и многослойных металлических материалов, члену редакционного совета журнала "Заготовительные производства в машиностроении".

Коллектив редакции и редакционный совет нашего журнала поздравляют Андрея Ивановича с юбилеем! Желаем крепкого здоровья, научных успехов и дальнейшей плодотворной деятельности на благо российской науки и промышленности!

И.Г. Гун¹, А.Р. Вахитов², Ф.А. Столяров², И.А. Михайловский¹, А.В. Смирнов¹
 (¹АО НПО "БелМаг", г. Магнитогорск,
²Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)

Расчетное определение параметров модели кулоновского трения посредством моделирования процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника автомобиля

В процессе проектирования внутреннего рулевого наконечника автомобиля актуальна задача определения максимальной силы опрессовки на заданном перемещении с приемлемой точностью. Существенное влияние на данный технологический параметр оказывает трение на границе контактирующих поверхностей матрицы и корпуса внутреннего наконечника. Моделирование контактного взаимодействия поверхностей без учета действия силы трения может приводить к высокой погрешности результата. Для повышения точности получаемой в результате моделирования максимальной силы опрессовки предложено детерминировать параметры модели кулоновского трения без проведения большого объема экспериментальных работ с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: внутренний рулевой наконечник; опрессовка; максимальная сила опрессовки; статический коэффициент трения; кинетический коэффициент трения; модель кулоновского трения.

The task for determining of the maximum pressing force at given displacement with acceptable accuracy is urgent in the process of the car axial joint designing. Friction at the interface between the contacting surfaces of the matrix and the body of the axial joint has significant effect on this technological parameter. Modeling of the surfaces contact interaction without taking into account the action of the friction force can lead to high error in the result. The parameters of the Coulomb friction model without carrying out large amount of experimental work using the finite element method is proposed to determine to improve in the accuracy of the maximum pressing force obtained as result of modeling.

Keywords: axial joint; pressing; maximum pressing force; static coefficient of friction; kinetic coefficient of friction; Coulomb friction model.

В составе реечного рулевого управления автомобилей чаще всего применяют внутренние рулевые наконечники с неразъемным соединением корпуса и шарового пальца (рис. 1) [1]. Указанное неразъемное соединение (рис. 2) формируется в результате пластической деформации (опрессовки корпуса) [2].

В процессе проектирования перспективных изделий необходимо определять максимальную силу опрессовки внутреннего наконечника на заданном перемещении для оценки возможности реализации такой силы существующим оборудованием и необходимости модернизации сборочной линии.

На максимальную силу опрессовки оказывают значительное влияние [2]: геометрические

размеры исходной заготовки корпуса — диаметры наружной и внутренней цилиндрических поверхностей; свойства материала корпуса;

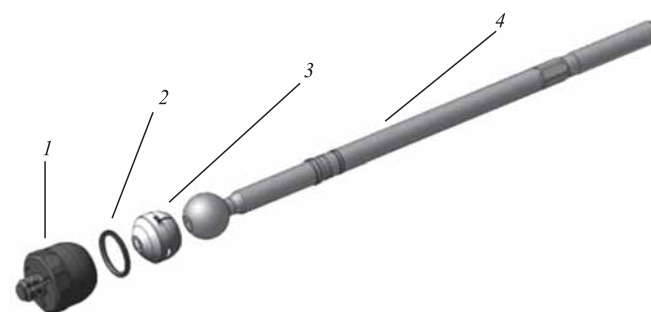


Рис. 1. Общий вид внутреннего рулевого наконечника:

1 — корпус; 2 — кольцо опорное; 3 — вкладыш; 4 — палец шаровой

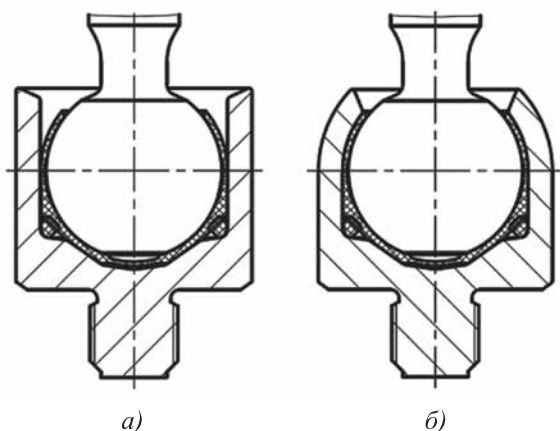


Рис. 2. Неразъемное соединение:

а — до опрессовки; *б* — после опрессовки

заданное перемещение и геометрия матрицы, которые определяются в процессе проектирования с точки зрения соответствия готового изделия основным эксплуатационным характеристикам [2]; сила трения скольжения между контактирующими поверхностями.

Сила трения скольжения зависит от следующих параметров [3]: внешней нагрузки, прикладываемой к каждому из контактирующих объектов; шероховатости рабочих поверхностей; твердости соприкасающихся поверхностей; наличия на рабочих поверхностях смазки, оксидной пленки и прочих промежуточных агентов, снижающих коэффициент трения; температуры контактирующих объектов; скорости взаимного перемещения частиц рабочих поверхностей.

Решена задача определения параметров кулоновской модели трения в процессе опрессовки внутреннего рулевого наконечника.

Силу трения скольжения можно представить как сумму двух составляющих [3]:

$$F = F_M + F_D, \quad (1)$$

где F_M — молекулярная (адгезионная) составляющая силы трения, Н; F_D — механическая (деформационная) составляющая силы трения, Н.

Молекулярная (адгезионная) составляющая обусловлена сопротивлением разрыву молекулярных или межатомных связей, которые возникают между контактирующими телами, а механическая (деформационная) составляющая вызвана сопротивлением упругому и пластическому оттеснению выступов контактирующих тел, внедрившихся при движении в контактирующие поверхности.

В условиях данной задачи рассмотрена механическая (деформационная) составляющая сил трения, поскольку молекулярная (адгезионная) составляющая незначительна в силу наличия на рабочих поверхностях смазки, оксидной пленки и прочих промежуточных агентов, препятствующих возникновению значительных молекулярных или межатомных связей [3].

В общем виде зависимость силы трения от взаимного перемещения контактирующих тел, прижатых друг к другу, представлена на графике (рис. 3). На графике рис. 3 можно выделить два характерных участка:

— участок 1: предварительное смещение L_s под действием сдвиговой силы до предельного значения силы трения покоя F_s (статической силы трения) без взаимного скольжения между телами;

— участок 2: срыв и скольжение тел относительно друг друга под действием F_k (кинетической силы трения).

Моделирование процесса опрессовки без учета сил трения между контактирующими поверхностями, как показала практика, иногда приводит к значительной погрешности максимальной силы опрессовки. Моделирование процесса опрессовки без учета сил трения можно рассматривать в качестве инструмента для определения геометрии матрицы [2]. Для повышения точности *конечно-элементной модели* (КЭМ) предложено учесть модель изотропного кулоновского трения, используя два различных подхода в различных расчетных средах. Необходимость определения параметров модели кулоновского трения моделированием обусловлено сложностью проведения экспериментальных исследований для определения коэффициента трения на физических объектах.

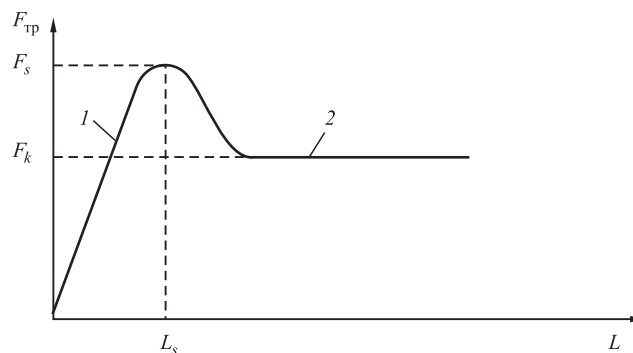


Рис. 3. Характерные случаи формирования сил трения:
1 — сила трения покоя; 2 — сила трения скольжения

Для оценки точности полученной в результате моделирования максимальной силы опрессовки путем сравнения результата с экспериментальными данными были отобраны три заготовки корпуса с максимально близкими размерами и механическими свойствами. Проведена опрессовка внутренних рулевых наконечников с записью диаграммы сила—перемещение. Соответствующие размеры, механические свойства и величина перемещения реализованы в модели.

Максимальную силу опрессовки предложено определять в результате моделирования процесса методом конечных элементов по явной схеме интегрирования с учетом физической и геометрической нелинейностей (рис. 4 и 5). В данной КЭМ приняты следующие допущения [4]:

- в силу осевой симметричности задачи рассмотрена 1/4 часть корпуса с граничными условиями симметрии;
- в состав КЭМ не включены вкладыш из высоковязкого ацетального гомополимера и резиновое опорное кольцо в силу меньшей жесткости по сравнению с жесткостью корпуса [4], а также шаровый палец. Указанные компоненты не оказывают значительного влияния на максимальную силу опрессовки;
- упругопластическое поведение материала корпуса описывается билинейной диаграммой напряжение—деформация.

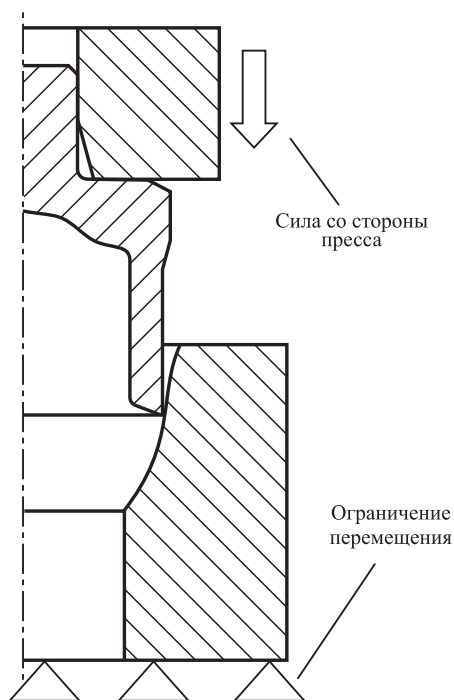


Рис. 4. Расчетная схема

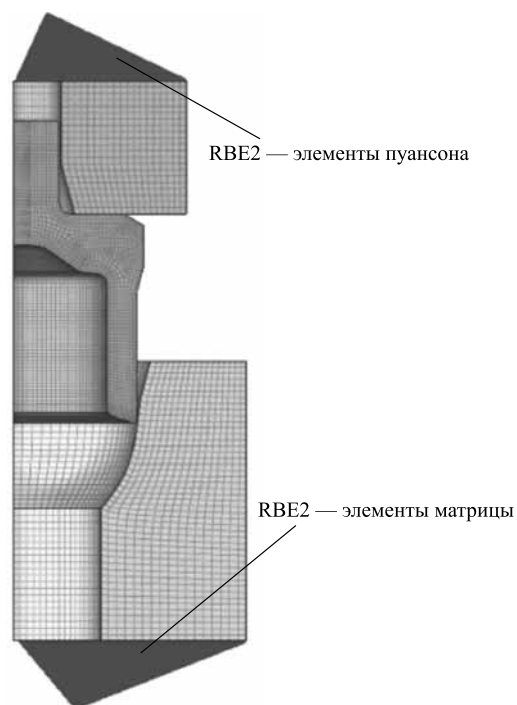


Рис. 5. Конечно-элементная модель

КЭМ реализована в виде объемных восьми-узловых гексаэдров, а также в модели введены балочные элементы типа RBE2 для определения силы опрессовки.

Граничные условия КЭМ:

- условие симметрии;
- заделка в узле балочных RBE2-элементов матрицы;
- принудительное перемещение независимого узла RBE2-элемента пуансона;
- контакт поверхностей корпуса и матрицы, корпуса и пуансона реализован методом штрафных функций с учетом кулоновской модели трения.

В расчетной среде № 1, основываясь на изотропной кулоновской модели, трение можно идеализировать как возрастающую силу сопротивления, направленную против сил сдвига с нулевым тангенциальным скольжением в месте контакта, вплоть до достижения статической силы трения. После достижения статической силы трения начинается скольжение, и сила статического трения переходит в кинетическую, которая после начала скольжения остается постоянной. На рис. 6 данное представление силы трения показано в виде кусочно-линейного графика [5].

Однако в анализе методом конечных элементов такая идеализация может привести

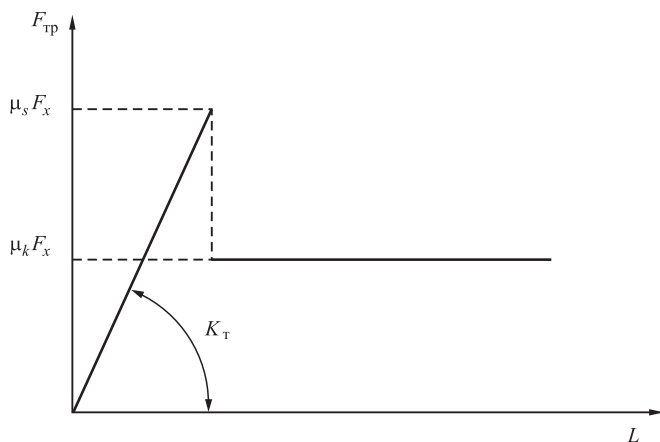


Рис. 6. Модель кулоновского трения в расчетной среде № 1 (F_x — нормальная сила)

к трудностям сходимости из-за наличия разрыва между двумя линейными участками. Поэтому использована модель нелинейной пружины, в которой поперечная сила трения линейно увеличивается с расстоянием скольжения пропорционально жесткости K_T , пока не достигнет статической силы трения, равной $\mu_s F_x$ (где μ_s — статический коэффициент трения; F_x — нормальная сила в контактном элементе), а затем переключается на кинетическую силу трения, равную $\mu_k F_x$ (где μ_k — кинетический коэффициент трения), которая после этого остается постоянной.

В рамках нелинейного анализа в расчетной среде № 1 модель пружины реализована на основе фиксированного расстояния скольжения (рис. 7), задаваемого как параметр FRICESL, который обеспечивает однозначную идентификацию прихвата или проскальзывания, имеет высокую производительность и сходимость при решении из-за стабильной обработки переходов от прихвата к скольжению.

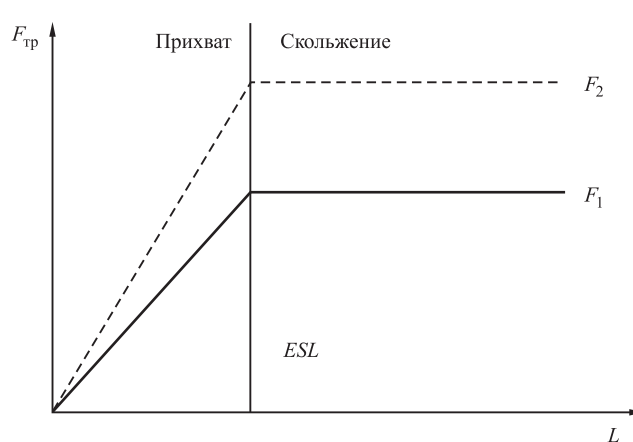


Рис. 7. Модель трения на основании взаимного упругого скольжения:

ESL — расстояние упругого прилипания

По результатам вариации значений статического μ_s и кинетического μ_k коэффициентов трения достигается приемлемая точность получаемой силы опрессовки. Далее значения μ_s и μ_k использованы в конечно-элементной расчетной среде № 2.

В расчетной среде № 2 модель кулоновского трения можно представить в виде экспоненциального изменения коэффициента трения в зависимости от скорости v взаимного перемещения частиц рабочих поверхностей и экспоненциального коэффициента β [6—8]:

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) e^{-\beta v}. \quad (2)$$

Результаты моделирования представлены на рис. 8 (см. обложку). Сравнение результатов моделирования с учетом трения и без него с результатами экспериментальных данных приведены в таблице и на рис. 9 (см. обложку).

Удовлетворительная с точки зрения точности модель кулоновского трения с параметрами $\mu_s = 0,45$; $\mu_k = 0,2$ и $\beta = 0,08$ показана на рис. 10.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными объектами

Параметр	Номер образца			Среднее значение
	1	2	3	
Экспериментальная сила, Н	244 380	238 400	245 040	242 606,7
Сила, Н	Конечно-элементная расчетная среда № 1 (без учета трения) 89 751			
Относительная погрешность, %	63,27	62,35	63,37	63,01
Сила, Н	Конечно-элементная расчетная среда № 1 (с учетом трения) 237 049			
Относительная погрешность, %	2,99	0,57	3,26	2,29
Сила, Н	Конечно-элементная расчетная среда № 2 (с учетом трения) 240 766			
Относительная погрешность, %	1,47	0,99	1,74	0,75

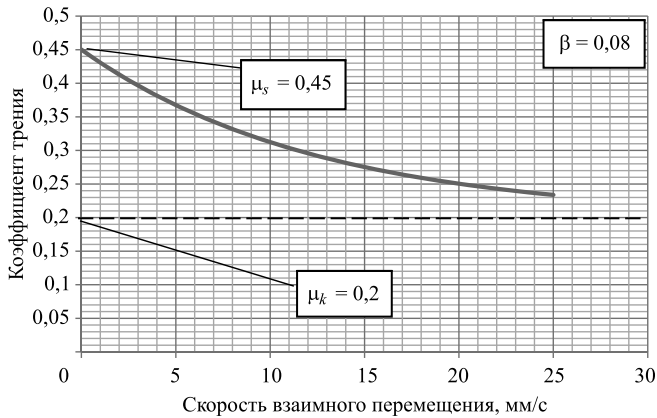


Рис. 10. Полученная по результатам расчета базовая модель кулоновского трения

Выводы

1. По результатам моделирования процесса определения силы опрессовки внутренних рулевых наконечников необходимо учитывать силу трения между поверхностями корпуса и матрицы. Коэффициенты статического и кинетического трения, а также коэффициент затухания можно определять без проведения экспериментальных исследований итерационно с использованием модели кулоновского трения в двух формулировках (на основе кусочно-линейного графика и базовой модели кулоновского трения). Адгезионную составляющую силы трения учитывать нет необходимости из-за ее незначительности в силу наличия на рабочих поверхностях смазки, оксидной пленки и прочих промежуточных агентов, препятствующих возникновению значительных молекулярных или межатомных связей.

2. Полученная модель кулоновского трения в виде экспоненциального изменения коэффициента трения в зависимости от скорости взаимного скольжения тел позволяет определять максимальную силу опрессовки с приемлемой точностью.

3. Для решения перспективных задач с аналогичной постановкой полученную модель кулоновского трения можно принять адекватной. Коэффициенты полученной модели: $\mu_s = 0,45$; $\mu_k = 0,2$; $\beta = 0,08$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шаровой шарнир: пат. 185066 Рос. Федерация, МПК F16C 11/06 (2006.01) / Гун И.Г., Калмыков Ю.В., Гун Е.И., Артюхин В.И., Вахитов А.Р.; заявитель и патентообладатель АО НПО "БелМаг". № 2018105009; заявл. 09.02.2018; опубл. 19.11.2018, Бюл. № 32. 9 с.

2. Моделирование процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников / Е.И. Гун, А.Р. Вахитов, В.В. Сальников, И.Г. Гун, Хон Ортуэта, Агустин Анитуа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 1. С. 46—52. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>.

3. Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2013. 192 с.

4. Расчетное определение показателей прочности шаровых шарниров элементов шасси автомобиля путем моделирования процесса статических испытаний / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, В.В. Сальников, В.И. Куцепедник, Е.И. Гун // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 2 (85). С. 20—24.

5. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. М.: Металлургия, 1982. 312 с.

6. MSC/DYTRAN User's Manual. The MacNeal-Schwendler Corporation, 1997.

7. Jeffrey Fluhrer, DEFORM 2D Version 8.1 User's Manual, 2010. URL: <https://docplayer.net/58172150-Deform-tm-2d-version-8-1-user-s-manual.html> (дата обращения: 20.10.2020).

8. Peng Y., Li J.Q., Zhan Y. et al. Finite Element Method-Based Skid Resistance Simulation Using In-Situ 3D Pavement Surface Texture and Friction Data // Materials. 2019. 12 (23). 3821. <https://doi.org/10.3390/ma12233821>.

Игорь Геннадьевич Гун, д-р техн. наук,
goun@belmag.ru;

Александр Рафаэльевич Вахитов;

Фёдор Алексеевич Столяров;

Игорь Александрович Михайловский, д-р техн. наук;

Алексей Вячеславович Смирнов, канд. техн. наук

К сведению авторов журнала «ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)»

В редакцию представляются:

1. Статья в электронном виде – файл (с расширением .doc) с набором текста (шрифт Times New Roman). Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 15 страниц, набранных 12-м кеглем через полтора интервала.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

2. Сведения об авторах:

- фамилии, имена и отчества авторов;
- ученая степень (если есть);
- место работы;
- контактный телефон, e-mail, почтовый адрес;
- страна (для иностранных авторов).

Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.

3. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии и инициалы авторов;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

Требования к оформлению статьи

1. На первой странице указывать УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации <http://teacode.com/online/udc/>).

2. Сведения о грантах необходимо давать ссылкой, обозначенной звездочкой (*), на первой странице.

3. Статья должна быть структурирована:

- *Введение*, содержащее реферативное изложение постановки задачи и возможного применения полученных результатов, актуальность рассматриваемой проблемы.
- *Основная часть* должна иметь несколько внутренних разделов и содержать формализованную постановку задачи и предлагаемый метод ее решения; отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных; преимущество развиваемого метода по сравнению с существующими; содержать пример, подтверждающий работоспособность и эффективность предложенного решения.
- *Заключение*, содержащее обсуждение полученных результатов, рекомендации.

4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинские (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

5. После текста должен быть приведен библиографический список, составленный по порядку ссылок в тексте и оформленный по ГОСТ 7.0.5–2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать 10 наименований.

6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf., .jpeg и разрешением 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисовочную подпись. Подрисовочные подписи следует представлять отдельным списком в виде файла Microsoft Word.

Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование. В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении редакционного совета без представления рецензии.



ИЗДАТЕЛЬСТВО ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Уважаемые читатели!

Продолжается подписка на журналы ООО «Издательство
«Инновационное машиностроение».

С 2021 года вы можете подписаться на наши журналы
как в печатном, так и в электронном виде в формате pdf.

Заявки направляйте на e-mail: realiz@mashin.ru



Дополнительная информация по тел.:
(495) 785 60 69, +7 916 558 76 92
и на сайте www.mashin.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 14.12.2020. Подписано в печать 04.02.2021. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солишнз".
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.