

---

---

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 621.73.02

**ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ  
ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЗАГОТОВОК  
ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ****© 2023 г. С. Н. Полянский<sup>1,\*</sup>, С. В. Бутаков<sup>2</sup>, А. М. Антимонов<sup>2</sup>,  
И. С. Ольков<sup>2</sup>, В. А. Александров<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*Компания “Инновационные технологии”, Екатеринбург, Россия*<sup>2</sup>*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия*<sup>3</sup>*Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия**\*e-mail: psn50@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.03.2023 г.

После доработки 13.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

В статье рассмотрены защитные технологические покрытия для операций низкотемпературной деформации полуфабрикатов и изделий из труднодеформируемых сплавов (титан, цирконий и т.п.). Исследовался процесс низкотемпературной изометрической деформации изделий из сплава ВТ6, фрикционные и разделительные свойства защитных технологических покрытий методом сжатия кольцевых образцов. Проведены лабораторные исследования и промышленные испытания пилотных партий покрытий. Представлены рекомендации по применению защитных технологических покрытий.

*Ключевые слова:* титан, защитные технологические покрытия, осадка, изотермия

**DOI:** 10.31857/S0235711923040119, **EDN:** XVZWHJ

Надежность машин и механизмов во многом зависит от технологии изготовления деталей, входящих в данные устройства. Получение заготовок деталей машин методом пластической деформации широко применяется в технике. Одной из проблем при обработке давлением некоторых сплавов является сложность процессов на контактных поверхностях заготовки и инструмента.

При выборе решения использовали опыт работ потребителей и изготовителей ЗТП.

Известно, что при деформировании некоторые сплавы (в частности, титана, циркония и т.д.) имеют склонность к схватыванию и налипанию на инструмент, истиранию и появлению надиров на поверхности деформируемого изделия [1–3]. Извлечение штампуемого изделия после залипания в инструменте приводит к возникновению механических повреждений поверхности детали и штампа. Надежность работы защитных технологических покрытий (ЗТП) определяет показатели качества обрабатываемого изделия.

Технологические покрытия в процессах горячей деформации полуфабрикатов и изделий из сплавов титана должны обеспечить снижение тепловых потерь, защиту от газонасыщения и обезлегирования, пластифицирование приповерхностных слоев металла и демпфирование ударных нагрузок [1, 2, 4, 5].

На текущий момент известно об успешном промышленном применении ЗТП на основе боросиликатных стекол с добавками различных компонентов при производстве полуфабрикатов и изделий из сплавов титана в процессах горячей деформации при температурах 750–1200°C [4].

В патенте Ugine-Sejnorget [6] заявлен рабочий диапазон температур 60–1000°C работы стеклянных боросиликатных покрытий (толщина покрытий 0.5–0.75 мм, после деформации 0.0254 мм). Наилучшее смазывающее действие обеспечивает стекло с оксидом свинца, но применение свинца запрещают экологические службы. Такую же перспективу прогнозируют и для боросиликатных стекол.

За все последующие годы процесс приготовления и нанесения покрытий, также материалы, используемые в операциях горячего деформирования, не претерпели существенных изменений [4]. ЗТП на основе боросиликатных стекол сохраняют приоритет. Однако, применение боросиликатных стекол недопустимо при обработке изделий из сплавов циркония.

Выполнен анализ тенденций развития ЗТП, методов обработки и гомогенизации поверхности, совместимости пар трения. На предприятиях США и Европы внедрение новых рецептур покрытий и смазок проводят в кооперации с поставщиками смазок, производителями прессового оборудования, природоохранными компаниями, компаниями потребителями. В исследовательских центрах разрабатывают новые рецептуры смазок, основанные на наноструктурированных водных дисперсиях смазывающих и разделяющих агентов. Хорошие характеристики продуктового ряда смазок достигаются успехами в разработке термодинамической концепции рецептур, заключающейся в эндотермической реакции создания слоя бездымного и беспламенного газа на поверхности матрицы при горячей операции ковки.

Крупнейшие разработчики и производители ЗТП основные усилия направляют на основных потребителей своего продукта – производителей стальных изделий и полуфабрикатов. Внедрение современных технологий фосфатирования поверхности стальных заготовок позволило безболезненно сократить потребность в операциях горячего деформирования. Известна практика успешной реализацииковки/штамповки стальных полуфабрикатов с фосфатными защитно-смазочными покрытиями при температурах низкотемпературной и холодной деформации. Также известны многочисленные исследования новых рецептур покрытий и смазок, а также технологии их нанесения, подготовки и обработки поверхности обрабатываемого изделия. Получает развитие струйная технология “NO-RINSE”, при которой в одной операции выполняют очистку, обезжиривание, нанесение конверсионного слоя для последующей операции нанесения покрытия.

Тенденция развития технологии деформирования материалов из труднодеформируемых сплавов предусматривает реализацию обработки в область температур низкотемпературной деформации, преимущественно в условиях изотермии.

Отметим, что производители полуфабрикатов из сплавов титана (Doncaster, Snecma, Timet etc.) и поставщики ЗТП (Henkel–Acheson, C. Bechem, Condat, Fuchs Lubritech etc.) не рекомендуют применять при изотермии стеклоэмалевые покрытия. Поскольку в процессе наблюдается налипание частиц эмали на поверхность штампа, что в дальнейшем приводит к дефектам поверхности изделия. Удаление налипших частиц увеличивает трудоемкость операции.

Ведущие производители полуфабрикатов из сплавов титана применяют в операциях изотермической штамповки нитрид бора в виде порошка, суспензии или пасты, который наносят на поверхности изделия и штампа. Применение ограничивает высокая стоимость материала.

Авиастроительные фирмы в целях снижения затрат и улучшения фрикционных свойств ЗТП традиционно используют для режимов горячего и низкотемпературного деформирования металлические покрытия [7]. Стандарты предприятий Boeing,

ВАЕ предусматривают использование металлических покрытий на базе меди, иттрия и др. Также рекомендуют для уменьшения сил трения дополнительно пропитывать ЗТП раствором с низкой вязкостью и хорошей смачиваемостью поверхности. Благодаря пористости ЗТП впитывает до 10–25% смазывающего материала (по объему покрытия).

Температурные и механические условия работы при изотермическом деформировании сплавов выдвинули новые требования к ЗТП. В этом процессе вязкость покрытий должна быть постоянной для обеспечения стабильности температурных свойств технологической смазки. Фрикционные показатели покрытия должны обеспечивать снижение усилия деформирования для “легкого” извлечения детали из штампа без повреждений поверхности изделия и инструмента. При переходе к низкотемпературной деформации нагрузка на деформирующий инструмент возрастает на 50%, и смазка начинает играть доминирующую роль [8].

В работах [8–13] проведены исследования покрытий в процессе осадки кольцевых образцов из сплавов титана с применением твердых смазок (графит, дисульфид молибдена, дисульфид вольфрама, нитрид бора) боросиликатных и керамических покрытий, слюды.

Выбор марки ЗТП зависит от параметров операции технологического нагрева (температура, продолжительность) и материала деформируемого изделия. Параметры покрытия (толщина, количество слоев) и смазки подбирают индивидуально для конкретного процесса деформации.

Таким образом, анализ тенденций развития технологии горячего деформирования, действий экологических и санитарно-гигиенических служб позволяет сделать вывод об актуальности работы по подбору новых покрытий и методов нанесения и формирования покрытий.

**Целью** настоящей статьи является исследование фрикционных и разделительных свойств защитных технологических покрытий в процессе низкотемпературной изометрической деформации изделий из титанового сплава ВТ6.

В ходе операции низкотемпературного изотермического деформирования изделий из сплавов титана параметры ЗТП должны обеспечить защитные, смазывающие и разделительные свойства на границе “инструмент–изделие”. При подготовке опытных работ изучены рекомендации ведущих мировых производителей титановых изделий (Doncaster, Snesma, Timet) и поставщиков ЗТП (Acheson, Condat, C. Vecchem). Получены опытные партии образцов покрытия и смазок от ведущих производителей.

Компания Condat для проведения опытных работ рекомендует рецептуру покрытия на основе нитрида бора марки Condatu 51 для диапазона рабочих температур 500–1000°C.

Компания Acheson предлагает для проведения опытных работ использовать новые рецептуры ЗТП: боросиликатное стекло Deltaglaze FB668 и смазку Deltaforge FB665 с большим содержанием фосфатов (температурный диапазон 600–750°C).

Компания C. Vecchem разработала для операций низкотемпературной и горячейковки уникальные рецептуры ЗТП двойного применения. Препарат Vegulit 935 используют для защиты поверхности заготовки при термообработке в диапазоне температур 125–950°C, смазки инструмента до температуры 380°C.

Для реализации задачи предложено использовать испытание на сжатие кольцевых образцов. Тест прост и достоверен для оценки степени газонасыщения, коэффициента  $\mu$  и фактора трения  $m$ , а также разделительных свойств ЗТП для различных деформируемых материалов, условийковки и смазки. В качестве свидетеля использовалась применяемая на российских предприятиях боросиликатная эмаль ЭВТ-26 [4]. Опыты проводились на испытательной машине Instron (100 кН). Скорость перемещения пуансона прессы – 0.5 мм/мин. Степень обжатия по высоте 50%. В качестве инструмента использовались плоские матрицы диаметром 30 мм, материал матриц – ЖС6У. Шеро-

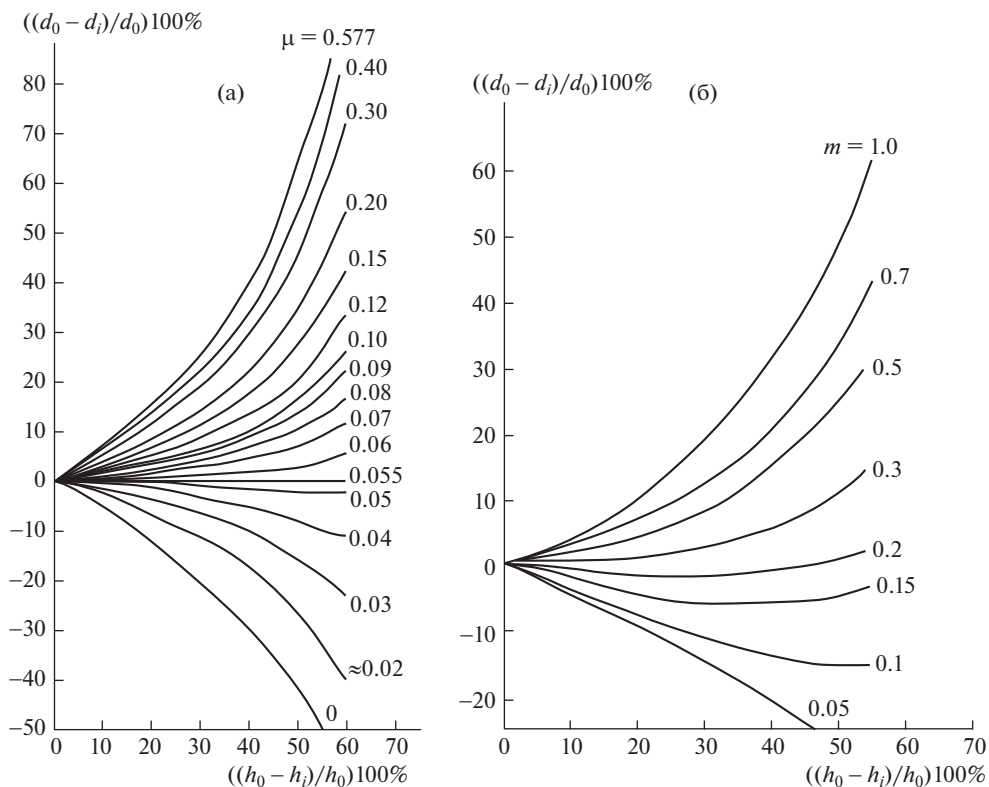


Рис. 1. Номограмма [9] для определения параметров трения: (а) – коэффициент трения,  $\mu$ ; (б) – фактор трения,  $m$ .

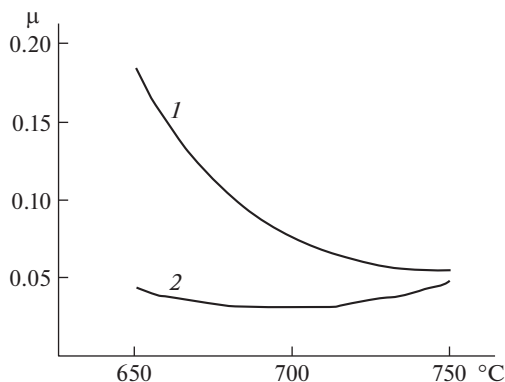
ховатость поверхности матрицы –  $Ra$  0.8–1.0 мкм. Штамп нагревался в электрической печи до рабочих температур 650, 700, 750°C. Продолжительность выдержки в печи образца и инструмента составляла 30 минут. Перед каждой прессовкой штамп очищался от остатков покрытий и наносился слой свежей смазки. Очистка проводилась с применением химических реагентов.

Изготовлены образцы из сплава ВТ6 с подготовленной микроструктурой (размер зерна 40 мкм). Соотношение размеров образцов 6: 3: 2 ( $18 \times 6 \times 9$  мм). Шероховатость торцевых поверхностей  $Ra$  2.2–2.5 мкм.

В работе [9] построены номограммы, отражающие зависимость величины изменения внутреннего диаметра образца  $d_0$  от степени деформации по высоте  $h_0$ . Каждая кривая соответствует определенному коэффициенту трения (рис. 1).

На начальном этапе выполнялись сравнительные испытания свойств покрытий отечественного и зарубежного производства. Построены зависимости изменения коэффициента трения от температуры (рис. 2).

Дополнительно изучалось состояние поверхности образцов перед нанесением покрытия. Покрытия наносились на поверхность образцов после струйно-абразивной обработки и/или химического травления. На первом этапе были выполнены операции осадки кольцевых образцов при температуре 650, 700 и 750°C с применением боросиликатных ЗТП Deltaglaze FB 668 и ЭВТ-26. После осадки измерялись высота и внутренний диаметр образцов. Диаметр измерялся в 3-х плоскостях по 2-м взаимоперпен-



**Рис. 2.** Изменение коэффициента трения  $\mu$  в зависимости от температуры: 1 – покрытие поверхности образца ЭВТ-26; 2 – покрытие поверхности образца Deltaglaze FB 668.

дикулярным осям. Сравнительная оценка фрикционных свойств образца проводилась по степени бочкообразования. Значение коэффициентов и факторов трения определялись по номограмме [9].

На образцах с покрытием FB 668 минимальное значение фактора трения получено при температуре 700°C, на 40% ниже, чем при температуре 750°C и на 37.5% ниже, чем при температуре 650°C. Значение фактора трения на образцах с покрытием ЭВТ-26 растет с понижением температуры. Величина роста составляет 73.25%. Фактор трения на образцах с покрытием FB 668 для всех температур ниже по сравнению с ЭВТ-26 (табл. 1).

При проведении сравнительных испытаний покрытий выявлено изменение фрикционных свойств в широком диапазоне. Получены значения коэффициента трения в пределах 0.200–0.031 (табл. 1). Построены зависимости изменения коэффициента трения от температуры (рис. 2).

Наименьшая разница величины трения зафиксирована при температуре 750°C, максимальная – при температуре 650°C. Величина коэффициента трения на образцах с покрытием ЭВТ-26 растет с понижением температуры. Величина роста составляет 73.25%. На образцах с покрытием Deltaglaze FB 668 минимальное значение получено при температуре 700°C, что на 40% ниже, чем при температуре 750°C и на 37.5% ниже, чем при температуре 650°C (рис. 2). Коэффициент трения на образцах с покрытием Deltaglaze FB 668 для всех температур ниже по сравнению с ЭВТ-26. Максимальное различие получено при температуре 650°C, относительная разность составила 76%.

Для оценки фрикционных и разделительных свойств различных рецептов ЗТП проведены испытания при температуре 700°C. Подготовлена партия образцов с металли-

**Таблица 1.** Зависимость коэффициента трения от температуры деформации

№ образца	Материал покрытия	Температура деформации, °C	Величина коэффициента трения, $\mu$
1	ЭВТ-26	650	0.200
2	ЭВТ-26	700	0.064
3	ЭВТ-26	750	0.054
4	FB 668	650	0.048
5	FB 668	700	0.031
6	FB 668	750	0.052

**Таблица 2.** Результаты испытаний по осадке кольцевых образцов из сплава ВТ6

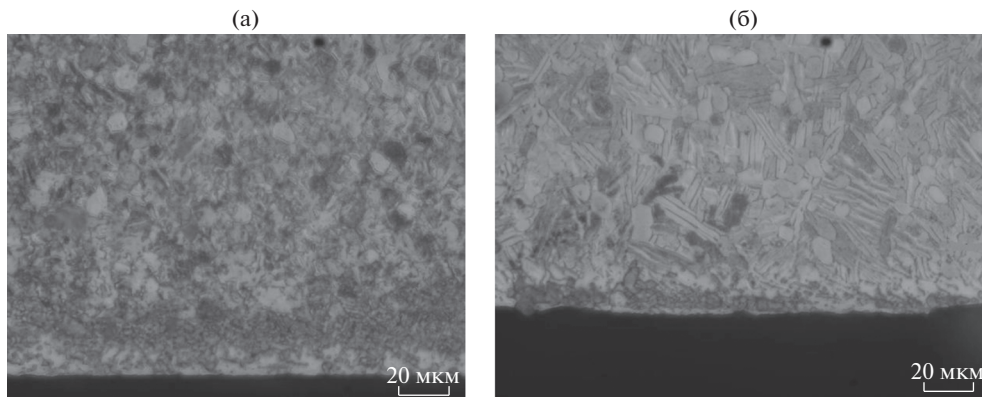
№	Наименование материала		Относительные геометрические размеры, %		Параметры трения	
	покрытия	пропитки	диаметр внутренний, $\Delta d$ , % (мм)	высота, $\Delta h$ , % (мм)	коэффициент трения, $\mu$	фактор трения, $m$
1	Berulit 935		33.1 (2.95)	48.4 (3.0)	0.20	0.70
2	Боросиликатная эмаль, ЭВТ-26		34.4 (0.4)	43.5 (2.7)	0.07	0.25
3	Deltaforge FB 685		23.1 (2.15)	50.0 (3.15)	0.12	0.50
4	Медь М1	Berulit 935	26.1 (2.3)	48.5 (3.2)	0.16	0.60
5	Медь М1	Нитрид бора, NB	19.8 (1.8)	50.1 (3.3)	0.12	0.45
6	Медь М1	Жидкое стекло, натриевое	12.9 (1.15)	49.2 (3.1)	0.09	0.35
7	Медь М1	Berulit 935 + Deltaforge FB 685	33.7 (3.0)	50.0 (3.25)	0.20	0.70
8	Алюминий, АД 1	Berulit 935	34.5 (3.0)	48.5 (3.2)	0.25	0.85

ческим (медным и алюминиевым) покрытием и боросиликатными стеклами. Металлические покрытия наносились методом электродуговой металлизации. Толщина покрытий 0.15–0.20 мм, пористость до 25%. Металлические покрытия пропитывали нитридом бора, жидким стеклом, водографитовым препаратом Berulit 935. Пропитывающие составы и эмали наносились методом погружения (табл. 2).

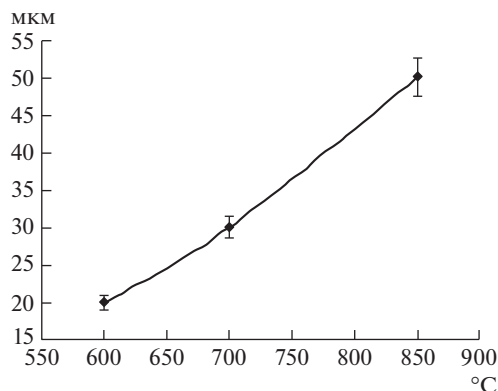
Оценка фрикционных свойств выполнялась аналогично предыдущему опыту [9]. Наименьшие значения коэффициента трения, фактора трения и удельного давления получены на образце 2 ( $\mu = 0.07$ ) с покрытием ЭВТ-26 и образце 6 с медным покрытием, пропитанным жидким стеклом ( $\mu = 0.09$ ) (табл. 2). Покрытие Berulit 935 проигрывает по фрикционным свойствам аналогам. Материал пропитки металлического покрытия регулирует фрикционные и разделительные свойства покрытия. Пропитка медного покрытия жидким стеклом снижает фактор трения в два раза по сравнению с пропиткой аналогичного покрытия боросиликатными эмалями. Пропитка порошком нитрида бора увеличивает коэффициент трения на 25%, но гарантирует отсутствие залипания заготовки в штампе. Комбинированная пропитка из боросиликатных стекол оказывает негативное воздействие на фрикционные свойства. Материал металлического покрытия оказывает доминирующее влияние на фрикционные свойства. Медное покрытие с пропиткой боросиликатной эмалью по сравнению с аналогичным алюминиевым покрытием снижает фактор трения на 30%.

Комбинация материала покрытия и пропитки кардинально изменяют картину деформирования. Разделительные свойства ЗТП оценивались по прочности сцепления (усилию залипания) образца с поверхностью матрицы. В результате испытаний отмечено схватывание образцов с поверхностью инструмента во всех случаях. Исключение составляет покрытие образца 5 с нитридом бора, образец самопроизвольно отделился от поверхности инструмента (табл. 2). Максимальная прочность сцепления отмечена на образце 8 с металлическим алюминиевым базовым покрытием и образце 2 с покрытием боросиликатной эмалью ЭВТ-26. Не наблюдалось одновременное схватывание образцов с верхней и нижней поверхностью матриц.

Определена зависимость изменения контактного давления при различных обжатах в процессе осадки. Расчет удельного давления выполнялся с использованием сред-



**Рис. 3.** Микроструктура поверхности образца из сплава ВТ6 после нагрева с покрытием Deltaglaze FB 668, продолжительность нагрева 2 ч: (а) – 650°С; (б) – 700°С.



**Рис. 4.** Зависимость глубины измененного слоя от температуры отжига в течение 30 мин.

них величин контактной площади после деформации. Давление изменялось в широких пределах 111–203 МПа, величина разброса – 45%. Контактное давление на образцах с покрытием ЭВТ-26 уменьшается с ростом температуры практически линейно на 66.7% при степени осадки 50%. На образцах с покрытием FB 668 контактное давление уменьшается по параболическому закону на 58.9% при степени осадки 50%.

В целях оценки состояния приповерхностных слоев выполнены металлографические исследования образцов из сплава ВТ6. Изготовление шлифов проводилось с использованием материалов и установки фирмы LECO. Исследование и фотографирование микроструктуры выполнялось на установке Neophot 32 с использованием системы обработки и анализа изображений SIAMS Photolab.

Состояние приповерхностного слоя оценивалось в соответствии с методикой ОАО “ВИЛС”: измерение микротвердости (прибор ПМТ-3М) на косом шлифе, свежетравленная, субмикронная зернистость образца из сплава ВТ6. Микроструктура приповерхностных слоев металла образцов представлена на рис. 3.

Газонасыщение в приповерхностных слоях металла образцов не обнаружено. Зафиксировано присутствие измененного приповерхностного слоя глубиной 20–50 мкм при температуре отжига 600–850°С (рис. 4).

Результаты исследований показывают, что термообработка при низких величинах уменьшает глубину дефектного слоя более чем в два раза (рис. 4).

Можно утверждать, что основное внимание следует направить на исследование покрытий и смазок для температур деформирования ниже 700°C, особенно в условиях изотермии, а также изучить свойства комбинированных покрытий, смазок и пропиток.

На основании анализа результатов испытаний выявлены основные преимущества и недостатки работы представленных покрытий.

**Выводы. 1.** Проведен анализ тенденций в развитии рецептур защитных технологических покрытий для процесса низкотемпературной деформации изделий из труднодеформированных сплавов в условиях изотермии. **2.** Доказана эффективность и надежность метода сжатия кольцевых образцов для оценки фрикционных и разделительных свойств ЗСП в операциях горячего деформирования металлов. Метод позволяет оперативно и эффективно определять свойства новых рецептур смазок и покрытий; не требует использования дорогостоящих измерительных приборов, технологической оснастки и др. **3.** В результате исследования рекомендованных рецептур покрытий и смазок, а также созданных на их основе композиционных покрытий выполнена количественная оценка коэффициента и фактора трения. **4.** Показано, что наименьшие значения фактора трения обеспечивают композиционное медное покрытие с пропиткой жидким стеклом и боросиликатные покрытия. При этом наилучшую стабильность фактора трения в исследуемом температурном диапазоне получили при использовании Deltaglaze FB 668. Отмечено отсутствие залипания изделия в штампе при использовании рецептур покрытий с использованием нитрида бора. **5.** В результате испытаний пилотных партий новых рецептур покрытий выявлено отсутствие газонасыщения и металлургических дефектов в приповерхностных слоях металла.

Необходимо продолжить работы по разработке и исследованию составов ЗТП, по изучению приповерхностного слоя деформируемого металла.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avitzur B. Handbook of metal-forming processes. New York: Wiley, 1983. 1020 p.
2. Хайнике Г. Трибохимия. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 584 с.
3. Кокрофт М.Г. Смазка в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1970. 111 с.
4. Солнцев С.С. Защитные покрытия металлов при нагреве. Справочное пособие. Изд. 2, доп. М.: URSS, 2009. 248 с.
5. Манегин Ю.В., Анисимова И.В. Стеклосмазки и защитные покрытия для горячей обработки металлов. М.: Металлургия, 1978. 224 с.
6. Sejournet J. US Patent 3039888. Method of Coating the Bore of a Heated Hollow, 1966.
7. Standard BAE APB 3 – 1108. British Aerospace PLC. Protective coating. GB, 1993. Iss. 1. 10 с.
8. Zhu Y., Zeng W., Ma X., Tai Q., Li Z., Li X. Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM // Tribology Int. 2011. V. 44 (12). P. 2074.
9. Male A.T. Friction measurement using the ring compression test // In Proceedings of the Seventh ICTP Conf. 1, 2002. P. 321.
10. Martin F. et al. The Ring Compression Test: Analysis of Dimensions and Canonical Geometry // Procedia Engineering. 2015. V. 132. P. 326.
11. Rajesh E., SivaPrakash M. Analysis of friction factor by employing the ring compression test under different lubricants // Int. J. of Scientific & Engineering Research. 2013. V. 4. Iss. 5. P. 1163.
12. Galdos L. et al. Characterization of Ti64 forging friction factor using ceramic coatings and different contact conditions // Procedia Engineering. 2017. V. 207. P. 2239.
13. Li L.X., Peng D.S., Liu J.A., Liu Z.Q. An experiment study of the lubrication behavior of graphite in hot compression tests of Ti-6Al-4V alloy // J. of Materials Processing Technology. 2001. V. 112 (1). P. 1.