

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
ТЕРМОСВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ИЗДЕЛИЯХ
ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА© 2020 г. Д. М. Забельян¹, И. А. Бурлаков¹, Д. Э. Гордин^{2,*},
Г. А. Мангасарян², Ю. А. Гладков³¹ АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», г. Москва, Россия² Московский политехнический университет, г. Москва, Россия³ Московский государственный технический университет им. Баумана, г. Москва, Россия

* e-mail: mitya.gordin@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.10.2018 г.

Принята к публикации 25.06.2019 г.

В статье приведены результаты экспериментального исследования процесса термического сверления в заготовках из труднодеформируемых сплавов на примере сплава ХН62ВМЮТ-ВД. Дан сравнительный анализ, показаны рациональные с точки зрения износа термических сверл и производительности процесса режимы, а также найденные геометрические параметры и материал инструмента для реализации операции термосверления. Показаны результаты моделирования программой QForm VX в сравнении с полученными результатами.

Ключевые слова: термическое сверление, никелевый сплав ХН62ВМЮТ-ВД, износ термических сверл, материал инструмента, моделирование программой QForm VX

DOI: 10.31857/S0235711919050146

Введение. Ряд деталей летательных аппаратов, изготавливаемых из жаропрочных сплавов типа никелевого сплава ХН62ВМЮТ-ВД, отличаются необходимостью формообразования большого количества отверстий относительно малого диаметра 2, ..., 4 мм (рис. 1). Одним из способов их формообразования является термическое сверление, основные возможности которого изложены в работах [1–3]. В сравнении с традиционным методом изготовления отверстий лезвийным инструментом термосверление обладает рядом преимуществ: универсальность процесса – один и тот же инструмент может быть применен для разных материалов и заготовок различных форм; высокая производительность процесса; простота геометрической формы инструмента для термосверления.

Целью настоящего исследования являлось определение возможности и рациональных режимов формообразования методом термического сверления отверстий с учетом износа инструмента в заготовках из жаропрочного сплава.

Материалы и методы исследования. В настоящем исследовании использовались заготовки из сплава ХН62ВМЮТ-ВД (состав масс в %: Cr – 17.5–20%, W – 5.5–7.5%, Mo – 4.0–6.0%, Al – 1.9–2.3%, Ni – основа), как одного из наиболее применяемых для газотурбинных двигателей летательных аппаратов. Для определения рациональных режимов термосверления проведены эксперименты на заготовках толщиной 5 мм, где переменными технологическими параметрами являлись частота вращения инструмента, скорость осевой подачи инструмента, время термосверления и время предварительно-

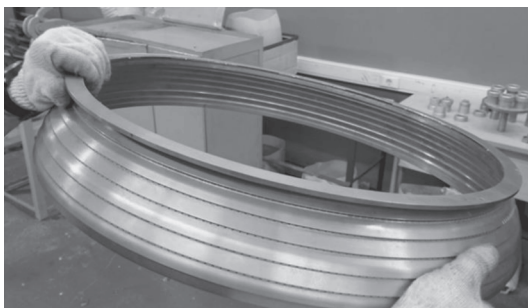


Рис. 1. Типовая деталь с большим количеством отверстий.

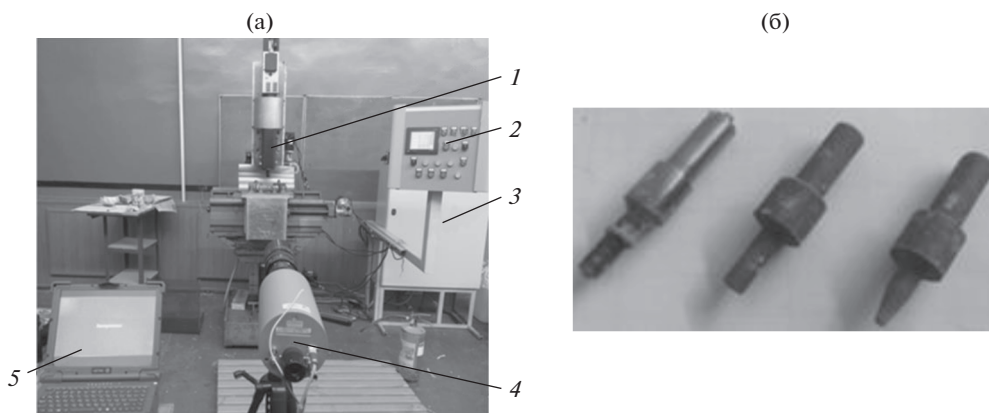


Рис. 2. Установка для термосверления: 1 – шпindelный узел установки; 2 – пульт управления установкой; 3 – электрошкаф; 4 – термовизор; 5 – ПК (вывод показаний термовизора). Термосверла – в левом верхнем.

го разогрева инструмента за счет контакта торца инструмента с заготовкой без его осевой подачи. Исследование было приведено на специализированной установке для термосверления (рис. 2). Материал термосверла был выбран на основе результатов моделирования процесса методом конечных элементов с применением программного комплекса QForm VX. Учитывая свойство вольфрама повышать пластичность с ростом температуры [4], термосверла предварительно подвели к заготовке до контакта и осуществляли разогрев за счет сил трения, что позволяло нагреть сверло до температуры 1000–1100°C и повысить его эксплуатационные свойства. Во избежание окисления вольфрама сверло покрывалось стеклоэмалью ЭВТ-24. Типовой инструмент для термосверления показан на рис. 2. Металлографические исследования осуществляли на бинокулярном микроскопе Olympus Delta с увеличениями 100 и 500.

Моделирование методом конечных элементов. При формообразовании отверстий методом термосверления передача тепла осуществляется при непосредственном контакте частей тела с различной температурой [5]. Схема теплообмена показана на рис. 3.

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, используемое для моделирования этого явления в программе QForm, имеет вид (обобщенно для заготовки и инструмента)

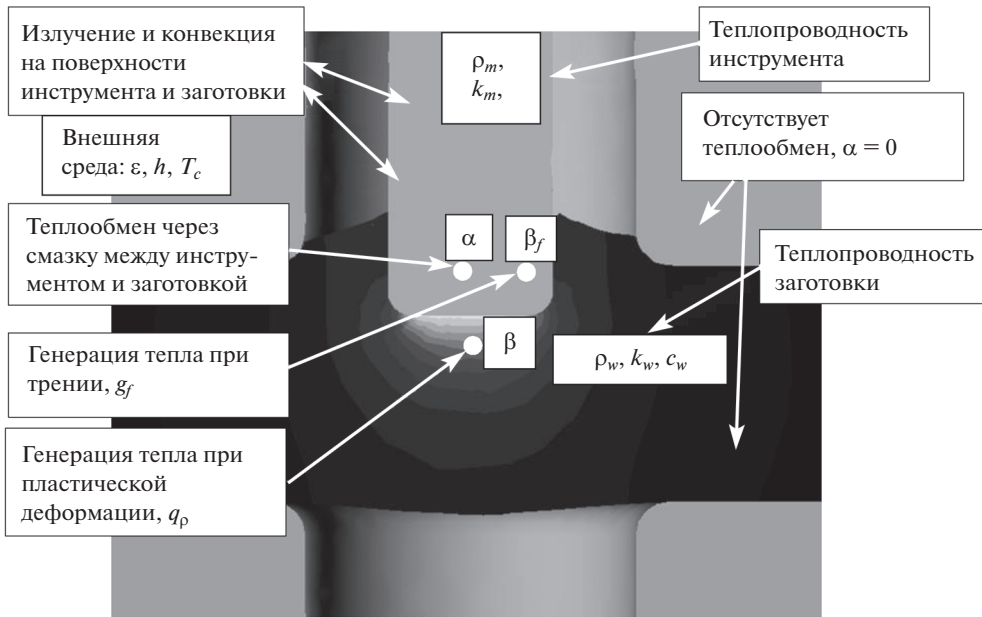


Рис. 3. Схема теплообмена при термосверлении: ε – степень черноты заготовки и инструмента; h – коэффициент теплоотдачи [Вт/(м² °К)]; T_C – температура окружающей среды [°С]; ρ_m, ρ_w – плотность инструмента и заготовки соответственно [кг/м³]; k_m, k_w – коэффициент теплопроводности инструмента и заготовки соответственно [Вт/(м °К)]; c_m, c_w – удельная теплоемкость инструмента и заготовки соответственно [Дж/(кг °К)]; T_m, T_w – температура инструмента и заготовки [°С]; α – коэффициент теплопередачи смазки [Вт/(м² °К)]; β_f – коэффициент преобразования работы трения в тепло; β_p – коэффициент преобразования работы деформации в тепло.

$$k_t \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_G = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

или в сокращенном виде

$$k_t(\Delta T) + q_G = \rho c \dot{T}$$

Здесь: \dot{T} – оператор Лапласа, T – температурное поле [°К], t – время [с], k_t – коэффициент теплопроводности [Вт/(м °К)], ρ – плотность [кг/м³], c – удельная теплоемкость [Дж/(кг °К)], q_G – мощность внутреннего источника тепла [Вт/м³].

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности необходимо задать начальные условия и граничные условия. Граничные условия определяются законами теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой за счет излучения и конвекции.

Теплообмен излучением задан законом Стефана–Больцмана

$$q_n = \varepsilon \sigma_0 (T_1^4 - T_C^4),$$

где q_n – удельный тепловой поток теплообмена излучением, $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана, T_1 – температура заготовки или инструмента, T_C – температура окружающей среды.

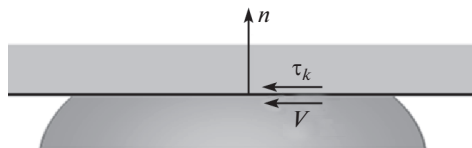


Рис. 4. Схема для расчета тепла, выделяемого от трения.

Конвективный теплообмен происходит в случае контакта поверхности твердого тела с газом (или жидкостью), имеющим другую температуру. Конвективный теплообмен заготовки с окружающей средой задан законом Ньютона–Рихмана

$$q_n = h(T_1 - T_c),$$

где q_n – удельный тепловой поток конвективного теплообмена.

При моделировании контакта заготовки с инструментом через смазку температура смазки не учитывается, а закон Ньютона–Рихмана используется в следующем виде

$$q_n = b_p \alpha (T_1 - T_2),$$

где α – коэффициент теплопередачи [Вт/(м² °К)] (комплексно учитывающий коэффициенты теплоотдачи между заготовкой и смазкой и между смазкой и инструментом), T_1 – температура заготовки, T_2 – температура инструмента; b_p – коэффициент паузы, показывающий во сколько раз необходимо уменьшить коэффициент теплопередачи при отсутствии плотного контакта между заготовкой и инструментом. Коэффициент паузы принимается во внимание при моделировании тепловой задачи во время технологической паузы (заготовка не деформируется).

В программе QForm мощность внутреннего источника тепла, представлена как сумма удельного внешнего теплового потока q_V (может быть задан в граничных условиях и использован для моделирования различных методов нагрева заготовки, для задачи термосверления не задается: $q_V = 0$), удельного теплового потока, обусловленного генерацией тепла в процессе пластической деформации q_p , и удельного теплового потока, обусловленного генерацией тепла в процессе контактного трения q_f .

$$q_G = q_V + q_p + q_f; \quad q_p = \beta_p \bar{\sigma} \dot{\epsilon}; \quad q_f = \beta_f \tau_k V,$$

где $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений (эффективное напряжение), $\dot{\epsilon}$ – интенсивность скоростей деформаций (эффективная скорость деформаций), V – относительная скорость перемещения в материале на границе (рис. 4).

Внешние удельные касательные силы трения τ_k определяются по закону трения Леванова [5]

$$\tau_k = mk \left(1 - \exp \left(-b \frac{\sigma_n}{\sigma_s} \right) \right),$$

где m – фактор трения, b – экспериментальный коэффициент (по рекомендациям Леванова $b = 1.25$), σ_n – контактное давление, σ_s – сопротивление деформированию материала (согласно принятому в QForm критерию пластичности Мизеса [6] $\sigma_s = \bar{\sigma}$), $k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ – максимальные касательные напряжения при сдвиге (сдвиговые напряжения текучести).

Исходными данными для моделирования программой QForm VX [6–8] являлись: обрабатываемый материал – жаропрочный никелевый сплав ХН62ВМЮТ-ВД; материал инструмента – жаропрочный материал; объем заготовки неизменный; коэффи-

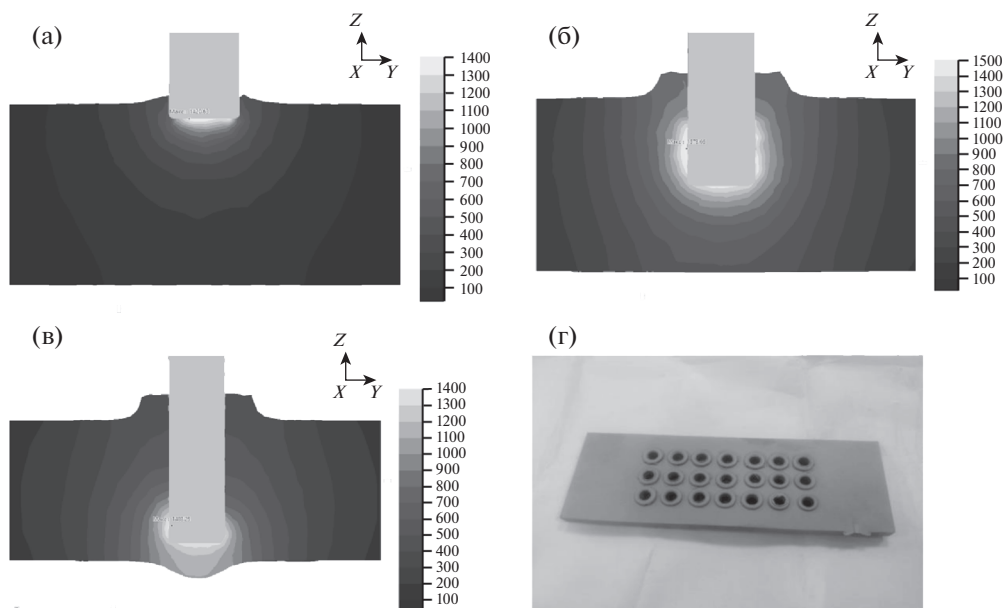


Рис. 5. Температурное поле в процессе термосверления заготовок из сплава ХН62ВМЮТ-ВД по результатам моделирования программой QForm VX. Максимальная температура в начале процесса – 1420°C (а), в середине процесса – 1579°C (б), в конце процесса – 1488°C (в), заготовка после термосверления (г).

коэффициент преобразования работы деформации в тепло – 0.95; коэффициент преобразования работы сил трения в тепло – 2.3 (значение коэффициента подбиралось с учетом компенсации погрешности расчета площади контакта инструмента и заготовки); диаметр рабочей части инструмента – 4.0 мм; инструмент совершает вращательное движение по часовой стрелке с частотой вращения до 15000 об/мин; уточнена модель материала: заданы зависимости плотности, теплоемкости и теплопроводности от температуры согласно данным [9]. Расширен диапазон температур реологической модели материала для уточнения экстраполяции сопротивления деформации при температурах, близких к температуре плавления, т.к. полученные данные методом дифференциально-термического анализа сплава ХН62ВМЮТ-ВД позволили установить, что температура плавления сплава составляет 1370–1400°C, а температура начала рекристаллизации – 900–920°C.

Результаты и обсуждение. По результатам моделирования (рис. 5) было определено, что температура в очаге деформации достигает величин близких 1600°C. Результаты металлографического анализа [1, 9] полученных образцов и показаний термовизора в целом подтвердили данные, полученные моделированием процесса термосверления. С учетом моделирования процесса и результатов экспериментов спроектирован и изготовлен инструмент из вольфрама, который имеет температуру плавления 3410°C и при этом высокие механические характеристики [10].

Данные в работе [11] показывают положительное влияние на механические характеристики материала деформационно-термической обработки.

Результаты экспериментов приведены на рисунках 3 и 4.

Анализ полученных данных показывает, что наибольшее влияние на износ инструмента оказывают частота его вращения и скорость осевой подачи. Что касается частоты вращения инструмента, то интенсивный износ начинается при скоростях враще-

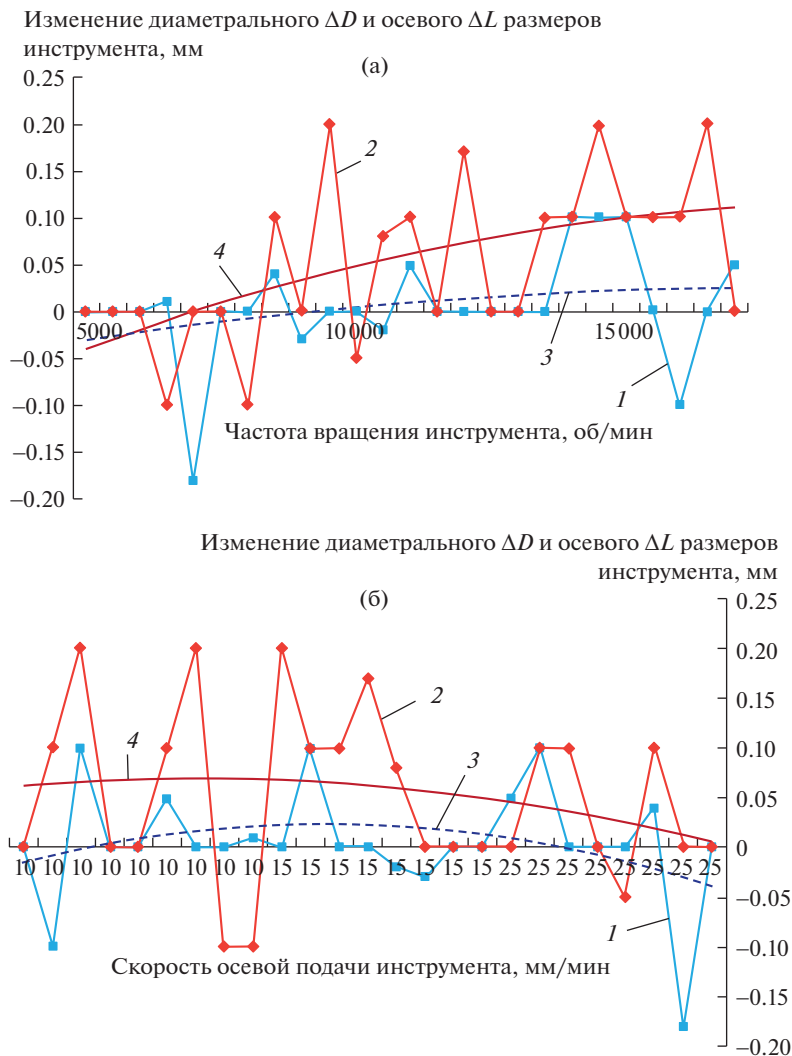


Рис. 6. Зависимости диаметрального (1) и осевого (2) износа инструмента от частоты вращения сверла (а) и скорости осевой подачи (б), где 3 — линия тренда диаметрального износа инструмента ΔD , 4 — линия тренда осевого износа инструмента ΔL .

ния свыше 10–12 тысяч оборотов в минуту. Повышение скорости осевой подачи инструмента до 25 мм/мин существенно снижает износ инструмента (рис. 6а).

Время термосверления, косвенно отражающее скорость осевой подачи, показывает, что наименьший износ инструмента наблюдается при времени обработки 16–18 секунд и при обработке в течение 45–50 секунд (рис. 7а).

Предварительный разогрев сверла за счет контактного трения целесообразно осуществлять в течение 1–2 секунд.

Заключение. Таким образом, рациональным режимом формообразования отверстий в рассматриваемых заготовках с точки зрения минимального износа инструмента

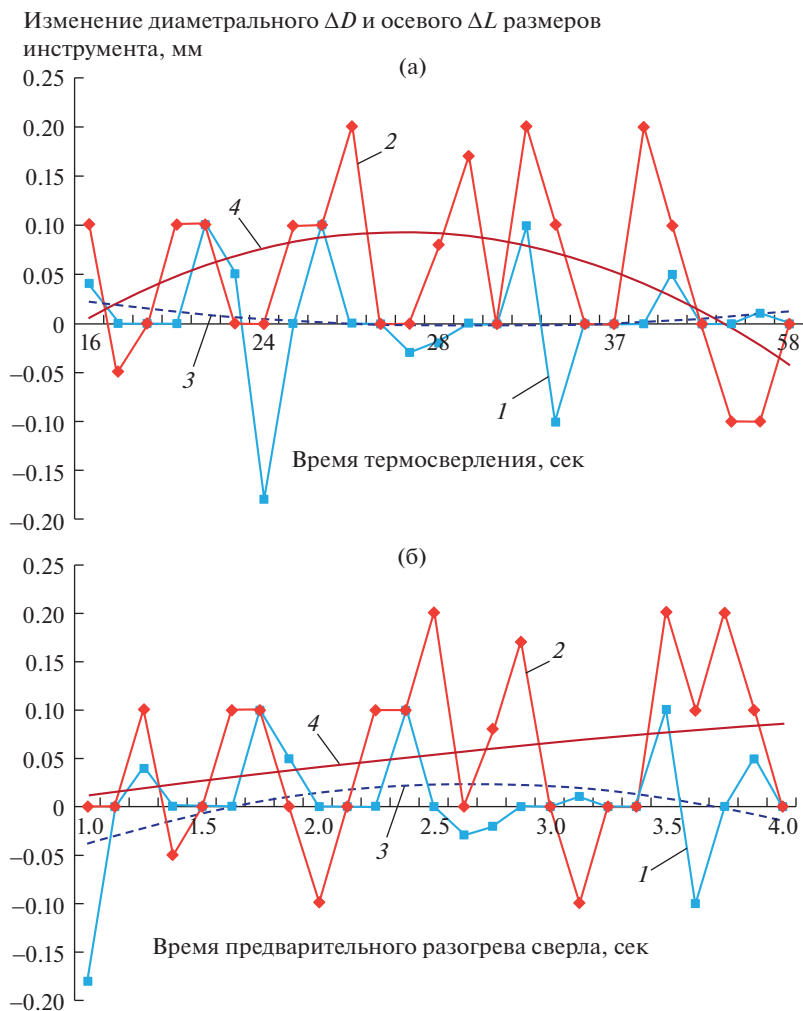


Рис. 7. Зависимости диаметрального (1) и осевого (2) износа инструмента от времени термосверления (а) и предварительного разогрева (б), где 3 — линия тренда диаметрального износа инструмента ΔD , 4 — линия тренда осевого износа инструмента ΔL .

является: предварительный подогрев сверла в течение 1–2 секунд; скорость осевой подачи 20–25 мм/мин; частота вращения инструмента 8000–1000 об/мин.

Выводы: показана возможность применения термического сверления для формообразования отверстий в никелевых сплавах ХН62ВМЮТ-ВД; найдены зависимости диаметрального и осевого износа термических сверл из вольфрама в зависимости от технологических режимов; показаны рациональные режимы термосверления, обеспечивающие минимальный износ инструмента при высокой производительности; осуществлено моделирование процесса программным комплексом QForm VX, позволившее определить основные параметры термического сверления заготовок из никелевых сплавов ХН62ВМЮТ-ВД.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлаков И.А., Забельян Д.М., Гладков Ю.А. и др. Особенности формообразования отверстий в заготовках из жаропрочных сплавов методом термического сверления // М.: Ж. КШП. 2016. № 12. С. 36.
2. Blau P.J. et al. Feasibility of thermally drilling automotive alloy sheet, castings, and hydro formed shapes. ETDE. 2007.
3. Деморецкий Д.А., Ненашев М.В., Ибатулин И.Д., Нечаев И.В., Ганигин С.Г., Мурзин А.Ю., Усачев В.В., Бакулин М.А. Технология и инструмент для термопластического формирования отверстий. Самара: Самарский гос. тех. универ., 2011.
4. Корнеев Н.И. и др. Обработка давлением тугоплавких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1975. С. 440.
5. Леванов А.Н. и др. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: "Металлургия", 1976. С. 416.
6. Власов А.В. Основы теории напряженного и деформированного состояний. Основы теории пластичности. Омск: ОмГТУ, 2012. С. 164.
7. Власов А.В. Моделирование тепловых процессов при ОМД методом конечных объемов в программе QForm // Ж. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2016. № 11.
8. Утяшев Ф.З., Сухоруков Р.Ю., Сидоров А.А., Ибрагимов А.Р. Письма о материалах. Математическое моделирование процессов изготовления осесимметричных деталей авиационного назначения методом локального деформирования // Уфа. 2015. № 5 (2). С. 175.
9. Burlakov I.A., Valitov V.A., Ganeev A.A., Zabel'yan D.M., Morozov S.V., Sukhorukov R.Yu., Utyashev F.Z. Modeling the Structure Formation during Hot Deforming the Billets of the Parts of Gas-Turbine Engines Made of Heat-Resistant Nickel // J. of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. № 5. P. 95.
10. Справочник по редким металлам / Под редакцией В.Е. Плюшева. М.: Мир, 1965. С. 922.
11. Мухтаров Ш.Х., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З. Влияние деформационно-термической обработки на структуру и механические свойства железоникелевого сплава // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 1. С. 40.