

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 621.7.043

**ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЕЦ  
РАКЕТНЫХ И ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6  
ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛОБУЛЯРНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ**© 2019 г. А. И. Алимов<sup>1,2,\*</sup>, С. А. Евсюков<sup>1</sup>, Р. Ю. Сухоруков<sup>2</sup><sup>1</sup> *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия*<sup>2</sup> *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**\*e-mail: alimov\_ai@bmstu.ru*Поступила в редакцию 09.07.2018 г.  
Принята к публикации 24.04.2019 г.

Исследованы закономерности поведения титанового сплава ВТ6 при горячей штамповке. Установлены определяющие зависимости, условия трения и модель эволюции микроструктуры. Кинетика фазовых превращений описана феноменологической моделью Джонсона–Мейла–Аврами–Колмогорова (ЖМАК). Работа посвящена обеспечению стабильности механических свойств колец из титанового сплава ВТ6 за счет получения глобулярной структуры путем выбора рациональных режимов технологического процесса обработки давлением.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, ВТ6, микроструктура, раскатка колец,ковка

**DOI:** 10.1134/S0235711919040035

**Введение.** Кольцевые детали находят широкое применение в промышленности в качестве вращающихся и неподвижных элементов машин. Кольца являются высоконагруженными ответственными деталями, поэтому к ним предъявляются повышенные требования по точности, механическим и эксплуатационным свойствам, макро- и микроструктуре, шероховатости [1, 2]. В настоящее время широко применяются методы получения осесимметричных деталей локальным деформированием [3–5], например, раскатка колец.

Кольца из титановых сплавов широко используются в авиационных и ракетных двигателях и являются особо ответственными. Выбор правильных режимов деформации и термообработки для титановых сплавов очень важен, так как механические свойства сплавов существенно зависят от типа и параметров микроструктуры. Ряд технологических параметров, которые в настоящее время не регламентируются или назначаются по справочной литературе, приводят к нестабильности получаемой микроструктуры поковок из сплава ВТ6, что, в свою очередь, приводит к нестабильности получаемых механических свойств. Низкая теплопроводность и высокий фактор трения титановых сплавов являются причиной локализации деформации и формирования неоднородной структуры. В зонах интенсивной деформации за счет теплового эффекта деформации температура металла может значительно превышать температуру фазового превращения сплава. Из-за колебаний химического состава температура полного полиморфного превращения сплава ВТ6 может изменяться от 930 до 1010°С. Эти факторы приводят к нестабильности получаемой микроструктуры поковок из сплава ВТ6, что приводит к нестабильности получаемых механических свойств.

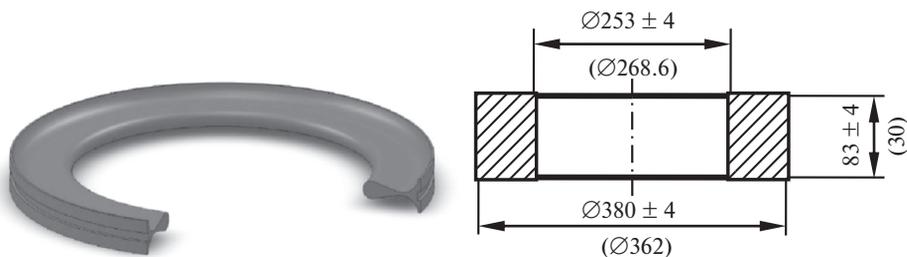


Рис. 1.

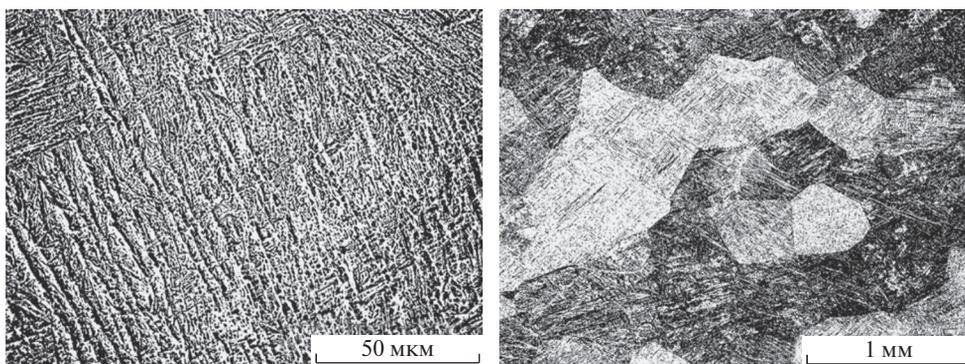


Рис. 2.

Целью настоящей статьи является обеспечение стабильности механических свойств раскатанных колец из титанового сплава ВТ6 за счет получения глобулярной структуры путем выбора рациональных режимов технологического процесса обработки давлением.

Исследование технологического процесса раскатки колец проводилось на примере заготовки армирующего кольца сильфона ракетного двигателя РД-171, 3D-модель и эскиз которого представлены на рис. 1.

**Материал и методика экспериментального исследования.** Материалом для исследований был выбран пруток диаметром 12 мм из титанового сплава ВТ6, изготовленный ПАО “Корпорация ВСМПО-АВИСМА”. Фактический химический состав сплава следующий, мас. %: 5.94 Al, 4.36 V, 0.04 Zr, 0.03 Si, 0.13 Fe, 0.05 C, ост. Ti. Заготовки нагревали до 1040°C, выдерживали при данной температуре 10 минут и закаливали в воду. Контроль температуры осуществляли по термопаре ХА, зачеканенной в заготовку. Термообработку использовали для получения ламеллярной структуры, которая характерна для слитков и полуфабрикатов, обработанных в  $\beta$ -области. Микроструктура сплава ВТ6 после закалки с 1010°C в воду ламеллярная со средним размером зерен  $\beta$ -фазы 337.4 мкм и средней толщиной пластин  $\alpha$ -фазы 1.43 мкм (рис. 2).

Температуру полного полиморфного превращения определяли согласно инструкции Всероссийского института авиационных материалов (ВИАМ) № 1054-76 [6] и она составила 955°C. Механические испытания проводили на образцах диаметром 5 мм и высотой 9 мм при скорости деформации 0.01–1 с<sup>-1</sup> и диаметром 10 мм и высотой 18 мм при скорости деформации 50 с<sup>-1</sup> в изотермических условиях с постоянной скоростью

деформирования, обеспечивающей заданную среднюю интегральную скорость деформации.

Численное моделирование процессов обработки металлов требует точной информации о свойствах деформируемого материала и параметрах трения. Методика инверсного анализа для определения кривой текучести при одной температуре была разработана Cho и Altan [7]. Для использования этой методики при определении семейства кривых течения для различных температурно-скоростных условий деформации была проведена модификация путем добавления суммирования по всем кривым течения. Методика испытаний на сжатие соответствует ASTM E-209 [8].

Определение кривых течения осуществляли путем минимизации целевой функции

$$\Phi = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^N \left( \frac{F_{ij} - f_{ij}}{F_{ij}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $K$  – количество кривых течения;  $N$  – число точек, аппроксимирующих кривую течения;  $F_{ij}$  – экспериментально определенная сила в точке, Н;  $f_{ij}(p)$  – сила рассчитанная в точке, Н.

Трение оказывает существенное влияние на конечное формоизменение и энерго-силовые параметры при штамповке. Для определения фактора трения использовали метод осадки кольца, предложенный в [9]. Для получения величины фактора трения следует сравнить изменение внутреннего диаметра кольца после испытания на сжатие с величиной, полученной методом конечных элементов, например, с помощью коммерческого пакета моделирования QForm.

Для построения модели эволюции микроструктуры необходимо знать долю глобулярной структуры и средний размер зерен после деформации. Деформированные образцы разрезали на электроэрозионном станке по оси, исследования проводили в центре образцов. Для правильного задания температуры деформирования, необходимо знать фактическую температуру полного полиморфного превращения. Металлографические исследования проводили при помощи микроскопа Olympus GX51, оборудованного специализированной цифровой камерой высокого разрешения UC30. Травление образцов проводили следующим составом: HF – 1 часть, HNO<sub>3</sub> – 2 части, H<sub>2</sub>O – 3 части. Средний размер зерен рассчитывали методом подсчета пересечений границ зерен и методом измерения длин хорд [10], долю глобулярной  $\alpha$ -фазы в бимодальной структуре определяли путем наложения сетки с размером ячейки 5 × 5 мкм [11]. Глобулярной считали морфологию  $\alpha$ -фазы с соотношением сторон менее трех к единице [12]. Температуру полного полиморфного (ТПП) превращения сплава ВТ6 определяли согласно инструкции ВИАМ № 1054-76 [6] на образцах диаметром 12 мм и высотой 10 мм. Построенные модели использовали при моделировании процесса изготовления колец методом конечных элементов в программных комплексах DEFORM и QForm.

**Результаты экспериментального исследования.** Кривые течения сплава ВТ6, полученные в результате инверсного анализа, представлены на рис. 3.

Значения фактора трения, полученные в результате испытаний на осадку кольца, представлены в табл. 1.

**Методика прогнозирования эволюции микроструктуры Ti-сплавов.** Для прогнозирования эволюции микроструктуры сплава ВТ6 была разработана методика, учитывающая динамическую глобуляризацию, а также прямое и обратное полиморфное превращение. Блок-схема алгоритма расчета представлена на рис. 4. Расчет производится следующим образом. По диаграмме изотермического превращения рассчитывается равновесная доля  $\beta$ -фазы. Если в данный момент осуществляется деформация в двухфазной области, то при накопленной степени деформации больше критической происходит расчет доли глобулярной структуры по уравнению Джонсона–Мейла–Аврами–Колмогорова. Если температура превышает температуру полного полиморфно-

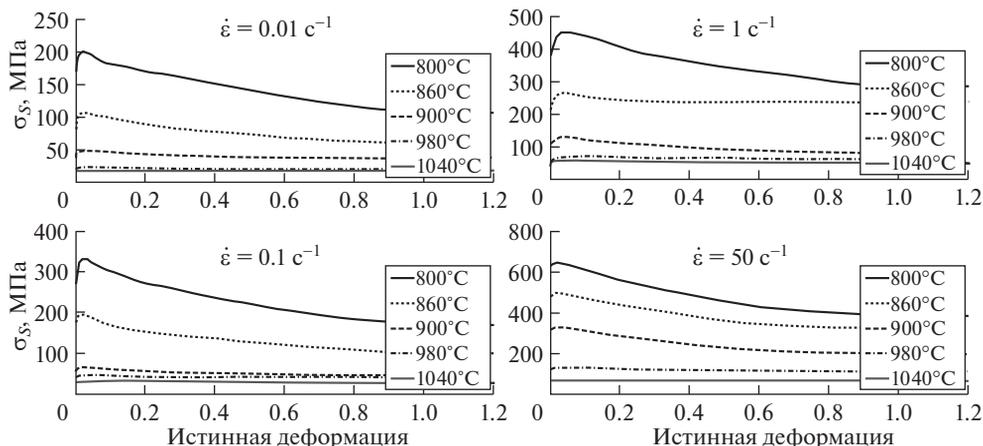


Рис. 3.

го превращения или накопленная степень деформации меньше критической, то доля глобулярной структуры принимается равной нулю. Расчет повторяется для каждого шага расчета.

Для идентификации параметров математической модели динамической глобуляризации сплава ВТ6 при обработке давлением в качестве факторов варьирования были выбраны температура испытания, средняя скорость деформации и истинная степень деформации. Исследуемый диапазон температур соответствует температурному интервалу штамповки сплава ВТ6, скорость деформации аналогична реализуемой при штамповке крупногабаритных поковок, а максимальная степень деформации была ограничена практически реализуемой при осадке. В качестве плана эксперимента была использована дробная реплика  $3^{3-1}/9$  (табл. 2).

Таблица 1

Смазка	Фактор трения
Без смазки	0.98
Графит	0.80
WS <sub>2</sub>	0.78

Таблица 2

№, п/п	T, °C	$\dot{\epsilon}$ , c <sup>-1</sup>	$\epsilon$
1	790	0.01	0.6
2	790	1	1.1
3	790	0.1	1.5
4	840	0.01	0.6
5	840	1	1.1
6	840	0.1	1.5
7	890	0.01	0.6
8	890	1	1.1
9	890	0.1	1.5

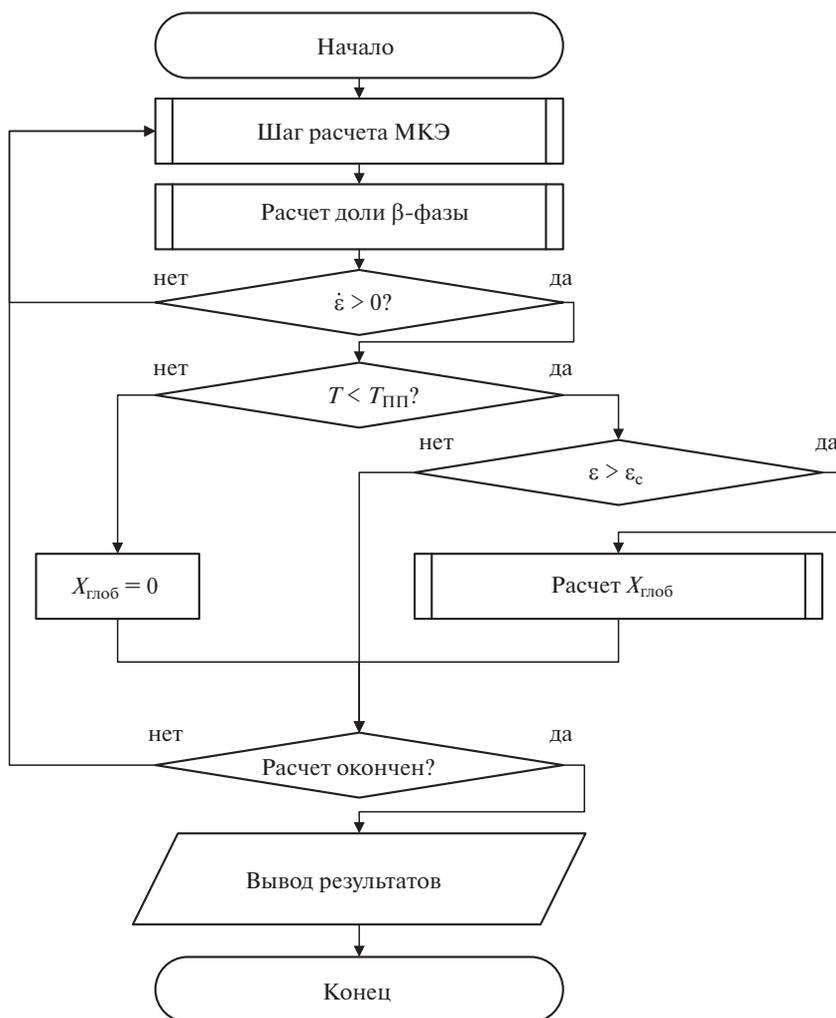


Рис. 4.

Кинетику динамической глобуляризации рассчитывали по модели Джонсона–Мейла–Аврами–Колмогорова с коэффициентами, полученными на основании проведенных экспериментов при помощи метода наименьших квадратов [13]

$$X_{\text{глоб}} = 1 - \exp \left[ -0.693 \left( \frac{\varepsilon}{0.132 \dot{\varepsilon}^{-0.07} \exp \left( \frac{21500}{RT} \right)} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Критическая степень деформации начала динамической глобуляризации была определена равной 0.5 [13], что соответствует данным из технической литературы [14].

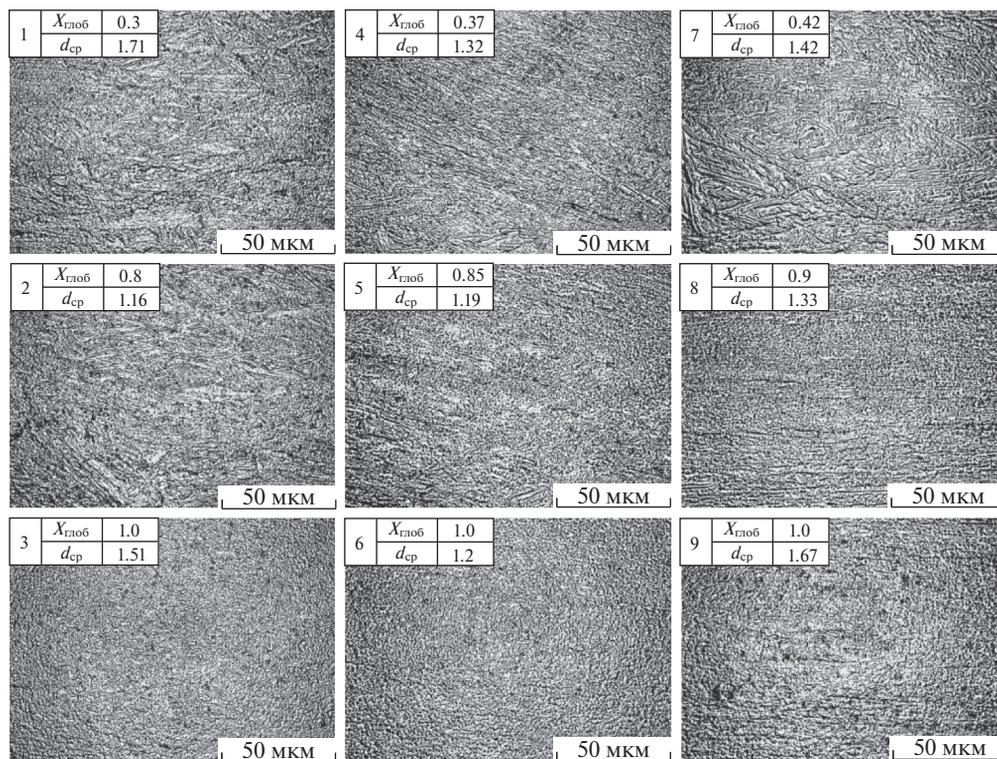


Рис. 5.

Снимки структуры, рассчитанная доля глобулярной структуры  $X_{\text{глоб}}$  и средний размер рекристаллизованных зерен  $d_{\text{ср}}$  в центральной точке образцов представлены на рис. 5.

Анализ снимков показал, что при увеличении температуры и степени повышается доля глобулярной структуры, а средний размер динамически рекристаллизованных зерен практически не зависит от режима деформации.

Для верификации модели динамической глобуляризации сплава ВТ6 проводили моделирование в программном комплексе DEFORM. При моделировании параметры режима деформации задавали аналогичные экспериментальным. Значения доли глобулярной структуры сплава ВТ6, рассчитанные по формуле (2) и определенные экспериментально представлены в табл. 3. Средняя ошибка составила 0.8%, максимальная — 11.5%.

Адекватность полученной модели была подтверждена проверкой по F-критерию с уровнем значимости  $\alpha = 0.05$ .

**Математическое моделирование.** Последовательность изготовления кольцевой заготовки состоит из осадки, прошивки, пробивки и раскатки. В качестве факторов варьирования при исследовании процессаковки были выбраны начальная температура, выдержка между ударами и общая степень деформации при осадке (табл. 4). Диапазон варьирования факторов был выбран в соответствии с используемым при ковке титановых сплавов.

Таблица 3

№ образца	$X_{\text{глоб\_расч}}$	$X_{\text{глоб\_мод}}$	$X_{\text{глоб\_эксп}}$	Ошибка, %
1	0.269	0.267	0.3	-11.0
2	0.907	0.892	0.8	11.5
3	0.947	0.944	1.0	-5.6
4	0.372	0.368	0.37	-0.5
5	0.919	0.908	0.85	6.8
6	0.941	0.935	1	-6.5
7	0.47	0.464	0.42	10.5
8	0.949	0.942	0.9	4.7
9	0.976	0.973	1	-2.7

Таблица 4

Варьируемые факторы	Уровни варьирования
Начальная температура, °C	$T_{\text{пп}} - 130 = 825$
	$T_{\text{пп}} - 80 = 875$
	$T_{\text{пп}} - 30 = 925$
Выдержка между ударами, с	2
	5
	8
Степень деформации при осадке	0.67
	0.72
	0.77

Была построена зависимость в форме полинома второй степени объемной доли глобулярной структуры  $\bar{X}_{\text{глоб}}$  от начальной температурыковки  $T$ , времени выдержки между ударами  $t$  и степени деформации при осадке  $\epsilon$  методом наименьших квадратов

$$\begin{aligned} \bar{X}_{\text{глоб}} = & 1.733 \times 10^{-3} T \epsilon + 0.048 t \epsilon + 2.911 \epsilon^2 - 5.183 \epsilon + 3.372 \times 10^{-4} T t - \\ & - 3.784 \times 10^{-3} t^2 - 0.247 t - 14.053 + 0.04 T - 2.582 \times 10^{-5} T^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Полученная модель аппроксимирует данные моделирования с множественным коэффициентом детерминации, равным 0.975. Было установлено, что наибольшее влияние на долю глобулярной структуры послековки оказывает начальная температура и время выдержки между ударами. Наибольшая доля глобулярной структуры была получена при начальной температуре 875°C, выдержке между ударами 8 с и степени деформации при осадке 0.77.

Расчет использовался для исследования технологического процесса раскатки колец. В качестве факторов варьирования были выбраны начальная температура заготовки и скорость поступательного движения оправки (табл. 5). Диапазон варьирования факторов был выбран в соответствии с практически используемым при раскатке титановых сплавов.

Результаты исследования представлены на рис. 6.

Таблица 5

Варьируемые факторы	Уровни варьирования
Начальная температура, °С	825
	875
	925
Скорость движения оправки, мм/с	2
	4
	6

**Анализ результатов моделирования.** Установлено, что сила и момент раскатки увеличиваются с уменьшением начальной температуры и увеличением скорости оправки. Влияние скорости оправки увеличивается с уменьшением температуры. Увеличение средней объемной доли глобулярной структуры при раскатке незначительно зависит от начальной температуры и скорости оправки и составляет, в среднем, 0.2. Средняя объемная доля глобулярной структуры после раскатки во всех случаях была более 90%.

Относительный внутренний диаметр кольца после раскатки увеличивался с увеличением скорости оправки и практически не зависел от начальной температуры. Относительное уширение кольца после раскатки увеличивалось с повышением начальной температуры и увеличением скорости оправки. Уширение кольца отсутствовало при скорости оправки 2 мм/с. Максимальная ширина кольца после раскатки увеличивается с повышением начальной температуры и увеличением скорости оправки.

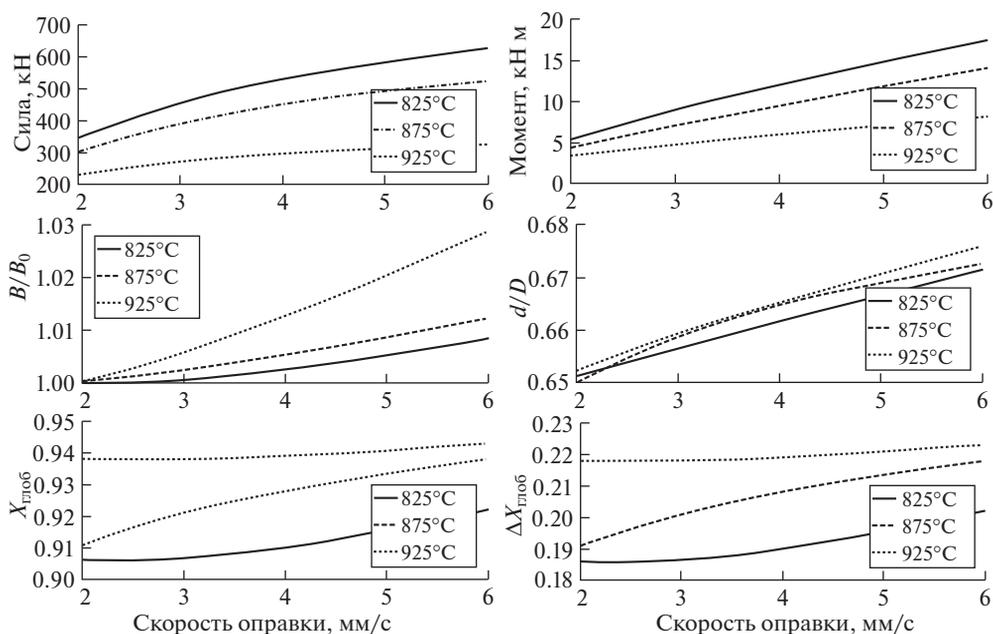


Рис. 6.

**Выводы.** В результате проведенных экспериментальных исследований определены кривые течения, параметры трения и кинетики глобуляризации сплава ВТ6, позволяющие использовать разработанную математическую модель для исследования влияния параметров технологического процесса изготовления колец на формоизменение, энергосиловые параметры и микроструктуру.

Разработанная математическая модель технологического процесса изготовления колец позволяет установить напряженное и деформированное состояние заготовки на любой стадии процесса, определить распределение температуры по объему поковки, предсказать возникновения дефектов, рассчитать энергосиловые параметры и спрогнозировать изменение микроструктуры. Методика проектирования технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 позволяет определять параметры режима технологического процесса изготовления колец с наибольшей долей глобулярной микроструктуры, что обеспечивает стабильность механических свойств.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burlakov I.A.* Modeling the Structure Formation during Hot Deforming the Billets of the Parts of Gas-Turbine Engines Made of Heat-Resistant Nickel Alloy // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. № 5. P. 95.
2. *Mukhtarov S.K., Utyashev F.Z., Sukhorukov R.Y.* Influence of the deformational heat treatment on the structure and mechanical properties of nickel-iron alloy // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. V. 44. № 1. P. 33.
3. *Утяшев Ф.З. и др.* Математическое моделирование процессов изготовления осесимметричных деталей авиационного назначения методом локального деформирования // *Ж. Письма о материалах*. Уфа: 2015. № 5 (2). С. 175.
4. *Utyashev F.Z. et al.* Specific Features of Rolling of Shaft of Gas Turbine Engine under Conditions of Superplasticity // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. V. 45. № 1. P. 65.
5. *Sukhorukov R. Yu. et al.* Physical and Numerical Modeling of the Process of Rolling Off of a Tapered Shaft of Aviation Purpose // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. V. 45. № 6. P. 538.
6. Инструкция “Металлографический анализ титановых сплавов”: Утв. ВИАМ от 10.02.1974. № 1054-76.
7. *Cho H., Altan T.* Determination of flow stress and interface friction at elevated temperatures by inverse analysis technique // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. V. 170. № 1–2. P. 64.
8. ASTM E0209-10 Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates.
9. *Male A.T.* A Method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation // *J. Inst. Metal*. 1964. V. 93. P. 38.
10. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения размера зерна.
11. ASTM E0562-11 Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count.
12. *Stefansson N., Semiatin S.L., Eylon D.* The kinetics of static globularization of Ti-6Al-4V // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002. V. 33. № 11. P. 3527.
13. *Алимов А.И.* Совершенствование технологии изготовления колец из титанового сплава ВТ6 путем определения рациональных режимов деформирования: Дис. ... канд. техн. наук. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. С. 160.
14. *Semiatin S.L., Seetharaman V., Weiss I.* Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti-6Al-4V with a colony alpha microstructure // *Materials Science and Engineering: A*. 1999. V. 263. № 2. P. 257.