



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Д. Р. Абашев, В. С. Бондарь, П. О. Диковицкий, С. В. Морозов, О. Е. Ларионова,
Высокотемпературное деформирование гранулированного никелевого сплава,
ТВТ, 2023, том 61, выпуск 6, 886–890

<https://www.mathnet.ru/tvt11878>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.88

23 апреля 2025 г., 20:45:12



УДК 539.43:531.781.2

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

© 2023 г. Д. Р. Абашев*, В. С. Бондарь, П. О. Диковицкий, С. В. Морозов, О. Е. Ларионова

*Московский политехнический университет, Москва, Россия***E-mail: tm@mospolytech.ru*

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 09.08.2023 г.

Принята к публикации 03.10.2023 г.

Предложен вариант теории термовязкопластичности, осуществляемый математическим моделированием вязкопластического поведения гранулированного никелевого сплава в условиях высоких температур и базирующийся на теории течения при комбинированном упрочнении. Вариант теории термовязкопластичности обобщен на неизотермическое нагружение и на зависимость процесса нагружения от скорости деформирования. Приведены результаты экспериментов на одноосное растяжение цилиндрических образцов из гранулированного никелевого сплава при высоких температурах и различных скоростях деформирования. Полученные расчетные диаграммы вязкопластического деформирования сопоставляются с экспериментальными. Наблюдается удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов, что свидетельствует об адекватности разработанных варианта теории термовязкопластичности и метода идентификации материальных параметров.

DOI: 10.31857/S0040364423060017

ВВЕДЕНИЕ

Авиационное двигателестроение является крупным потребителем сложнолегированных, в том числе порошковых (гранульных), сталей и жаропрочных сплавов на никелевой и титановой основах, которые трудно поддаются обработке давлением. Поэтому для формообразования из них заготовок дисков газотурбинных двигателей (ГТД) пятого и шестого поколений требуется разработка новых технологических процессов. Перспективными в этом отношении являются ротационные методы при высоких температурах [1–3].

В процессе изотермической раскатки в условиях высокой температуры материал подвергается вязкопластическому деформированию. Диаграммы вязкопластического деформирования материала при растяжении с различными скоростями деформирования после начального упрочнения имеют падающий участок разупрочнения вплоть до разрушения. Такое поведение материала обусловлено тем, что при высоких температурах имеет место кратковременная ползучесть, происходящая в условиях мощного разупрочнения.

Наиболее развитыми и перспективными направлениями математического моделирования термовязкопластического деформирования являются варианты теории термовязкопластичности, базирующиеся на теории течения при комбинированном упрочнении [4–14].

Рассматриваемый в работе вариант теории термовязкопластичности основан на теории неупругости [6, 7] и обобщен на неизотермическое нагру-

жение и на зависимость процесса нагружения от скорости деформирования. Вариант теории неупругости в отличие от [15–17] относится к теории течения при комбинированном упрочнении и описывает процессы знакопеременного нагружения (эффект Баушингера), которые имеют место при раскатке. Приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований вязкопластического поведения гранулированного никелевого сплава при одноосном растяжении в условиях высоких температур в широком диапазоне скоростей деформирования. Результаты расчетов сравниваются с данными экспериментов.

Целью работы является разработка варианта теории термовязкопластичности, позволяющей проводить моделирование процесса пластического деформирования гранулированного никелевого сплава, находящегося в условиях экстремально высоких температур с учетом скорости деформации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И УРАВНЕНИЯ ВАРИАНТА ТЕОРИИ ТЕРМОВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ

Материал предполагается однородным и изотропным. В процессе вязкопластического деформирования в нем может возникать только деформационная анизотропия. Тензор скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}$ представляется в виде суммы тензоров скоростей упругой $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ и неупругой $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ деформаций:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p.$$

Здесь и далее точка над символом обозначает производную по времени.

Процесс деформирования зависит от изменения температуры T и скорости деформирования ξ :

$$\xi = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}$ – девиатор скоростей деформации.

При изменении напряжений, температуры и скорости деформирования упругие деформации следуют обобщенному закону Гука

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij}^e &= \frac{1}{E} [\dot{\sigma}_{ij} - \nu (3\dot{\sigma}_0 \delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij})] + \alpha_{ij}^T \dot{T} + \alpha_{ij}^{\xi} \dot{\xi}, \\ \alpha_{ij}^T &= \alpha_T \delta_{ij} - \frac{1}{E^2} [\sigma_{ij} - \nu (3\sigma_0 \delta_{ij} - \sigma_{ij})] \frac{\partial E}{\partial T}, \\ \alpha_{ij}^{\xi} &= -\frac{1}{E^2} [\sigma_{ij} - \nu (3\sigma_0 \delta_{ij} - \sigma_{ij})] \frac{\partial E}{\partial \xi}, \end{aligned}$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, $\sigma_0 = \sigma_{ii}/3$ – среднее напряжение, δ_{ij} – символ Кронекера, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Полагается, что в пространстве составляющих тензора напряжений существует поверхность нагружения, разделяющая области упругого и неупругого состояний. Поверхность нагружения изотропно расширяется или сужается и смещается в процессе нагружения. Уравнение поверхности нагружения принимается в следующем виде:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2} (s_{ij} - a_{ij})(s_{ij} - a_{ij}) - C^2 = 0. \quad (1)$$

Здесь $s_{ij}^* = s_{ij} - a_{ij}$ – девиатор активных [4] напряжений, s_{ij} – девиатор напряжений. Тензор a_{ij} (добавочных напряжений [5], остаточных микронапряжений [4]) характеризует смещение поверхности нагружения в девиаторном пространстве напряжений, т.е. направленное (анизотропное) упрочнение. Скаляр C отвечает размеру (радиусу) поверхности нагружения и характеризует изотропное упрочнение (разупрочнение). Тензор a_{ij} и радиус C являются функционалами процесса нагружения.

Для радиуса поверхности нагружения принимается следующая зависимость:

$$\begin{aligned} C &= C_p(\epsilon_{u*}^p, T, \xi), \\ \dot{C} &= q_\epsilon \dot{\epsilon}_{u*}^p + q_T \dot{T} + q_\xi \dot{\xi}. \end{aligned}$$

Здесь $\dot{\epsilon}_{u*}^p = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}}$ – интенсивность скоростей неупругой деформации (скорость накопленной неупругой деформации); ϵ_{u*}^p – накопленная неупругая деформация (длина дуги траектории неупругой деформации); q_ϵ, q_T, q_ξ – определяющие функции, которые далее выражены через материальные.

Смещение поверхности нагружения определяется эволюционным уравнением Армстронга–Фредерика–Кадашевича [11, 12], обобщенным на неизотермическое [5, 7] нагружение и переменную скорость деформирования:

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} g \dot{\epsilon}_{ij}^p + g_a a_{ij} \dot{\epsilon}_{u*}^p + g_a^T a_{ij} \dot{T} + g_a^\xi a_{ij} \dot{\xi}.$$

Здесь g, g_a, g_a^T, g_a^ξ – определяющие функции, которые выражаются [6, 7] через материальные функции следующим образом:

$$g = \beta \sigma_a, \quad g_a = -\beta, \quad g_a^T = \frac{1}{\sigma_a} \frac{\partial \sigma_a}{\partial T}, \quad g_a^\xi = \frac{1}{\sigma_a} \frac{\partial \sigma_a}{\partial \xi}.$$

Неупругие деформации являются функционалами процесса нагружения и рассчитываются на основе ассоциированного с поверхностью нагружения (1) закона течения (градиентального закона течения):

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \lambda = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_u^*} \dot{\epsilon}_{u*}^p.$$

Здесь $\sigma_u^* = \left(\frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* \right)^{\frac{1}{2}}$ – интенсивность активных напряжений, λ – скалярная функция.

Скорость накопленной неупругой деформации $\dot{\epsilon}_{u*}^p$ при мягком (задаются компоненты тензора напряжений) и жестком (задаются компоненты тензора деформаций) режимах нагружения определяется [6, 7] следующим образом:

$$\dot{\epsilon}_{u*}^p = \frac{1}{E_*} \left[\frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* \dot{\sigma}_{ij}}{\sigma_u^*} - B^T \dot{T} - B^\xi \dot{\xi} \right], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{u*}^p &= \frac{1}{E_* + 3G} \times \\ &\times \left[3G \frac{s_{ij}^* (\dot{\epsilon}_{ij} - \alpha_{ij}^T \dot{T} - \alpha_{ij}^\xi \dot{\xi})}{\sigma_u^*} - B^T \dot{T} - B^\xi \dot{\xi} \right], \quad (3) \end{aligned}$$

$$E_* = q_\epsilon + g + g_a a_{u*}^*,$$

$$B^T = q_T + g_a^T a_{u*}^*,$$

$$B^\xi = q_\xi + g_a^\xi a_{u*}^*,$$

$$a_{u*}^* = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* a_{ij}}{\sigma_u^*}.$$

Здесь E_*, B^T, B^ξ – параметры, определяющие скорость накопления неупругой деформации, зависящие от определяющих функций.

Условия упругого и неупругого состояний следуют из того, что для неупругого состояния необходимо, чтобы изображающаяся точка процесса нагружения находилась на поверхности нагружения и определяемая скорость накопленной неупругой деформации была положительной, а упругое состояние следует при нарушении любого из двух упомянутых условий. Тогда условия упругого и неупругого состояний имеют следующий вид:

$$\sigma_u^* < C \cup \dot{\epsilon}_{u^*}^p \leq 0 \text{ – упругость,}$$

$$\sigma_u^* = C \cap \dot{\epsilon}_{u^*}^p > 0 \text{ – неупругость.}$$

Здесь под $\dot{\epsilon}_{u^*}^p$ подразумевается выражение, задаваемое уравнением (2) либо (3) или любым другим уравнением, связывающим скорость накопленной неупругой деформации и любой набор скоростей напряжений и деформаций (смешанное нагружение).

МАТЕРИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ И ИХ АППРОКСИМАЦИИ

Рассмотренный вариант теории термовязкопластичности замыкается следующими материальными функциями: $E(T, \xi)$, ν , $\alpha_T(T)$ – упругие параметры; $C_p(\epsilon_{u^*}^p, T, \xi)$ – функция изотропного упрочнения; $\sigma_a(T, \xi)$, β – параметры анизотропного упрочнения.

Эти функции следует аппроксимировать выражениями:

$$E(T, \xi) = K_E(T) \xi^{n_E(T)},$$

$$C_p(\epsilon_{u^*}^p, T, \xi) = E_C(T) \epsilon_{u^*}^p + C_0(T, \xi),$$

$$C_0(T, \xi) = K_C(T) \xi^{n_C(T)},$$

$$\sigma_a(T, \xi) = K_a(T) \xi^{n_a(T)}, \tag{4}$$

$$q_\epsilon = \frac{\partial C_p}{\partial \epsilon_{u^*}^p} = E_C, \quad q_T = \frac{\partial C_p}{\partial T} = \frac{dE_C}{dT} \epsilon_{u^*}^p + \frac{\partial C_0}{\partial T},$$

$$q_\xi = \frac{\partial C_p}{\partial \xi} = \frac{\partial C_0}{\partial \xi}.$$

Таким образом, на основе результатов экспериментов необходимо определить следующие материальные параметры: $K_E(T)$, $n_E(T)$, ν , $\alpha_T(T)$ – упругие параметры; $E_C(T)$, $K_C(T)$, $n_C(T)$ – параметры изотропного упрочнения; $K_a(T)$, $n_a(T)$, β – параметры анизотропного упрочнения.

Метод определения параметров гранулированного никелевого сплава основан на представлении экспериментальных данных в виде линейных зависимостей и использования метода наименьших квадратов. Материальные параметры сплава определены для температур 1050, 1100, 1150°C по набору

диаграмм растяжения при различных постоянных скоростях деформирования. Материальные параметры ν и $\alpha_T(T)$ взяты из справочной литературы.

Модуль Юнга определяется как тангенс угла наклона начального (упругого) участка диаграммы деформирования. Параметры K_E и n_E определяются по зависимости $\lg E$ от $\lg \xi$ для каждой температуры. Для определения скорости изотропного упрочнения E_C диаграмма деформирования перестраивается в диаграмму неупругого деформирования. На построенных диаграммах неупругого деформирования присутствует линейный участок, тангенс угла наклона которого и есть скорость изотропного упрочнения E_C . Начальный размер поверхности нагружения C_0 определяется напряжением, разделяющим области упругого и неупругого деформирования. Параметры K_C и n_C находятся по зависимости $\lg C_0$ от $\lg \xi$ для каждой температуры. Для определения параметров анизотропного упрочнения σ_a и β из диаграммы неупругого деформирования вычитается функция (4) изотропного упрочнения и получается диаграмма изменения главных компонент тензора микронапряжений $a = a_{11}$ от неупругих деформаций $\epsilon^p = \epsilon_{11}^p$. Далее полученная диаграмма перестраивается в координатах производная микронапряжения $da/d\epsilon^p$ – микронапряжение a . Аппроксимируя эту зависимость линейной функцией, можно получить [7] параметры σ_a и β . Параметры K_a и n_a определяются по зависимости $\lg \sigma_a$ от $\lg \xi$ для каждой температуры.

В таблице приведены материальные параметры гранулированного никелевого сплава при трех температурах. Для данных, приводимых в таблице, скорость деформирования ξ измеряется в s^{-1} .

Материальные параметры гранулированного никелевого сплава

$T, ^\circ C$	1050	1100	1150
$K_E, \text{ МПа}$	14000	14000	12000
n_E	0.0756	0.113	0.138
$K_C, \text{ МПа}$	745	456	255
n_C	0.166	0.166	0.166
$E_C, \text{ МПа}$	-1600	-1600	-780
$K_a, \text{ МПа}$	196	165	92
n_a	0.16	0.17	0.173
β	250	250	250
ν	0.3	0.3	0.3

**ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ
ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО
НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА**

Для получения достоверной экспериментальной диаграммы деформирования материала замер деформации осуществляется по перемещению захватов испытательной машины, отнесенному к длине рабочей части образца, измеряемой между серединами радиусов перехода от рабочей части к захватной. Испытания образцов проводятся при температурах 1050, 1100, 1150°C и скоростях

деформирования 0.032, 0.0053, 0.00053, 0.00026, 0.00011 с⁻¹. Экспериментальные диаграммы деформирования при разных температурах и скоростях деформирования приведены на рисунке.

Для расчетного нахождения параметров процесса нагружения при одноосном деформировании по заданной скорости осевой деформации и температуре решается задача Коши для системы уравнений при жестком одноосном нагружении, полученной на основе общих уравнений, приведенных выше. Пример такой системы уравнений приводится в работе [7]. Решение задачи Коши проводится по методу Рунге–Кутты четвертого порядка точности.

На рисунке сплошными кривыми показаны результаты, полученные на основе предложенного варианта теории вязкопластичности, а точками – результаты экспериментов. Отличие расчетных и экспериментальных результатов не превышает 10–15%, а погрешность экспериментов по измеряемым усилиям и перемещениям составляет 1%. Результаты математического моделирования удовлетворительно коррелируют с результатами проведенных экспериментов, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанного варианта теории вязкопластичности и метода идентификации материальных параметров.

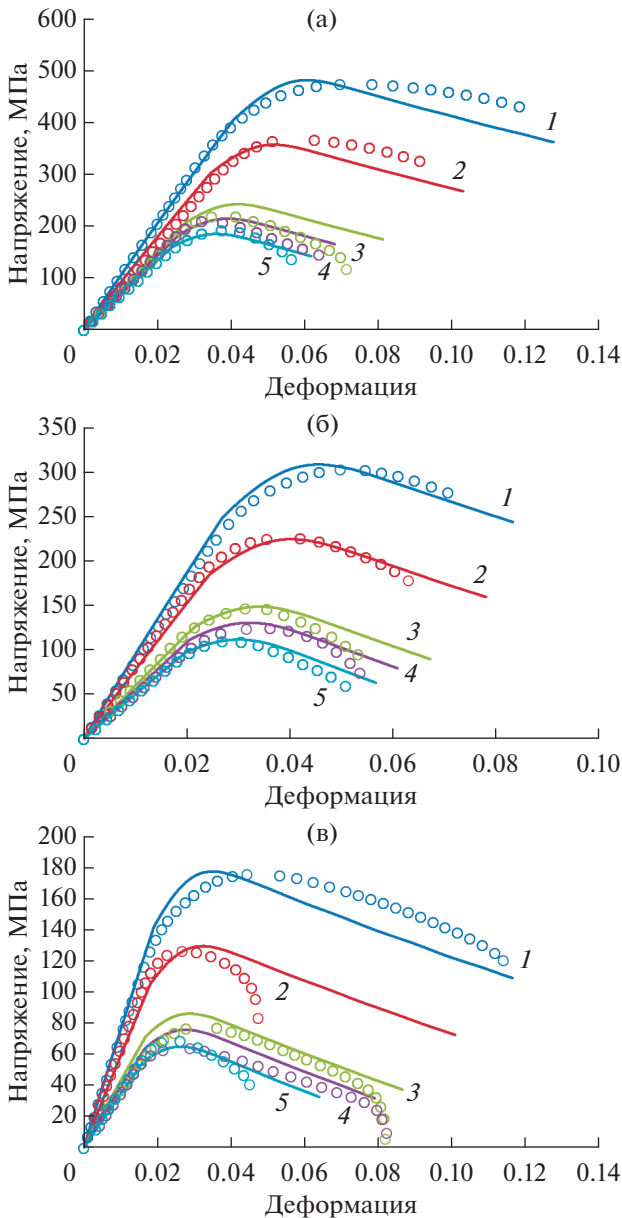
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы основные положения и уравнения варианта теории термовязкопластичности, учитывающей неизотермичность и влияние скорости деформирования на параметры процесса нагружения, для математического моделирования процесса раскатки дисков из гранулированного никелевого сплава. Разработан метод идентификации материальных параметров, замыкающих вариант теории термовязкопластичности. Получены материальные параметры гранулированного никелевого сплава.

Результаты проведенного математического моделирования удовлетворительно коррелируют с результатами экспериментов, что говорит об адекватности предложенного варианта теории термовязкопластичности и метода идентификации материальных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлаков И.А., Морозов С.В., Боровских И.А. Расчет технологических параметров изотермической раскатки дисков газотурбинных двигателей // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 2. С. 28.
2. Бурлаков И.А., Морозов С.В., Морозов С.В. Автоматическая линия для изотермической раскатки заготовок дисков газотурбинных двигателей // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 5. С. 26.



Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования гранулированного никелевого сплава при различных температурах: (а) – $T = 1050^{\circ}\text{C}$, (б) – 1100, (в) – 1150; 1 – $\dot{\xi} = 32 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, 2 – 5.3×10^{-3} , 3 – 0.53×10^{-3} , 4 – 0.26×10^{-3} , 5 – 0.11×10^{-3} .

3. *Целиков А.И., Казанская И.Л., Сафронов А.С. и др.* Поперечно-клиноватая прокатка в машиностроении. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
4. *Новожилов В.В., Кадашев Ю.И.* Микронапряжения в конструкционных материалах. Л.: Машиностроение, 1990. 224 с.
5. Термопрочность деталей машин. Спр. / Под ред. Биргера И.А., Шорра Б.Ф. М.: Машиностроение, 1975. 455 с.
6. *Бондарь В.С.* Неупругое поведение и разрушение материалов и конструкции при сложном неизотермическом нагружении. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: Изд-во МАМИ, 1990. 314 с.
7. *Bondar V.S.* Inelasticity. Variants of the Theory. N.Y.: Begell House, 2013. 194 p.
8. *Бондарь В.С., Горячева И.Г., Матвиенко Ю.Г. и др.* Ресурс материалов и конструкций / Под общ. ред. Бондаря В.С. М.: Изд-во Моск. Политеха, 2019. 192 с.
9. *Волков И.А., Коротких Ю.Г.* Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
10. *Темис Ю.М.* Моделирование пластичности и ползучести конструкционных материалов ГТД // Матер. 49-й Междун. науч.-техн. конф. ААИ "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных научных кадров". Школа-семинар "Современные модели термовязкопластичности". Ч. 2. М.: МАМИ, 2005. С. 25.
11. *Armstrong P.J., Frederick C.O.* A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect. CEBG Rep. № RD/B/N/ 731. 1966.
12. *Кадашев Ю.И.* О различных тензорно-линейных соотношениях в теории пластичности // Исследования по упругости и пластичности. Сб. ст. Л.: Изд-во ЛГУ, 1967. Вып. 6. С. 39.
13. *Chaboche J.-L.* A Review of Some Plasticity and Viscoplasticity Constitutive Theories // Int. J. Plasticity. 2008. V. 24. P. 1642.
14. *Bondar V.S., Abashev D.R.* Nonisothermic Cyclic Deformation of 12Cr18Ni10Ti Steel under High Temperatures // High Temp. 2022. V. 60. № 1. P. 134.
15. *Кибардин В.Ю., Кукуджанов В.Н.* Численное моделирование локализации пластической деформации и разрушения упругопластических материалов // Изв. РАН. МТТ. 2000. № 1. С. 109.
16. *Кукуджанов В.Н., Кибардин В.Ю.* Численное моделирование локализации деформаций и разрушения упруговязкопластических материалов // Изв. РАН. МТТ. 2001. № 1. С. 113.
17. *Пэжина П.* Основные вопросы вязкопластичности. М.: Мир, 1968. 176 с.