

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 сложнoleгированных, 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 $\dot{\xi}$:

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

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 $\epsilon_{u*}^p = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}}$ — 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:

$$\begin{aligned}\sigma_u^* &< C \cup \dot{\epsilon}_{u*}^p \leq 0 - \text{упругость,} \\ \sigma_u^* &= C \cap \dot{\epsilon}_{u*}^p > 0 - \text{неупругость.}\end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned}E(T, \xi) &= K_E(T) \xi^{n_E(T)}, \\ C_p(\epsilon_{u*}^p, T, \xi) &= E_C(T) \epsilon_{u*}^p + C_0(T, \xi), \\ C_0(T, \xi) &= K_C(T) \xi^{n_C(T)}, \\ \sigma_a(T, \xi) &= K_a(T) \xi^{n_a(T)}, \\ q_\epsilon &= \frac{\partial C_p}{\partial \epsilon_{u*}^p} = E_C, \quad q_T = \frac{\partial C_p}{\partial T} = \frac{dE_C}{dT} \epsilon_{u*}^p + \frac{\partial C_0}{\partial T}, \\ q_\xi &= \frac{\partial C_p}{\partial \xi} = \frac{\partial C_0}{\partial \xi}.\end{aligned}\quad (4)$$

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 с^{-1} .

Материальные параметры гранулированного никелевого сплава

$T, ^\circ\text{C}$	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 за- мер деформации осуществляется по перемеще- нию захватов испытательной машины, отнесен- ному 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 де- формирования при разных температурах и скоро- стях деформирования приведены на рисунке.

Для расчетного нахождения параметров про- цесса нагружения при одноосном деформиро- вании по заданной скорости осевой деформации и температуре решается задача Коши для системы уравнений при жестком одноосном нагружении, полученной на основе общих уравнений, приве- денных 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 предложенно- го варианта теории вязкопластичности, а точка- ми – результаты экспериментов. Отличие рас- четных и экспериментальных результатов не превышает 10–15%, а погрешность эксперимен- тов по измеряемым усилиям и перемещениям составляет 1%. Результаты математического моде- лирования удовлетворительно коррелируют с ре- зультатами проведенных экспериментов, что позволяет сделать вывод об адекватности разрабо- танного варианта теории вязкопластичности и ме- тода идентификации материальных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы основные положения и урав- нения варианта теории термовязкопластичности, учитывающей неизотермичность и влияние скоро- сти деформирования на параметры процесса нагру- жения, для математического моделирования про- цесса раскатки дисков из гранулированного нике- левого сплава. Разработан метод идентификации материальных параметров, замыкающих вариант теории термовязкопластичности. Получены ма- териальные параметры гранулированного нике- левого сплава.

Результаты проведенного математического мо- делирования удовлетворительно коррелируют с ре- зультатами экспериментов, что говорит об адекват- ности предложенного варианта теории термо- вязкопластичности и метода идентификации материальных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлаков И.А., Морозов С.В., Боровских И.А. Расчет технологических параметров изотермической рас- катки дисков газотурбинных двигателей // Загото- вительные производства в машиностроении. 2010. № 2. С. 28.
2. Бурлаков И.А., Морозов С.В., Морозов С.В. Автома- тическая линия для изотермической раскатки за- готовок дисков газотурбинных двигателей // Заго- товительные производства в машиностроении. 2012. № 5. С. 26.

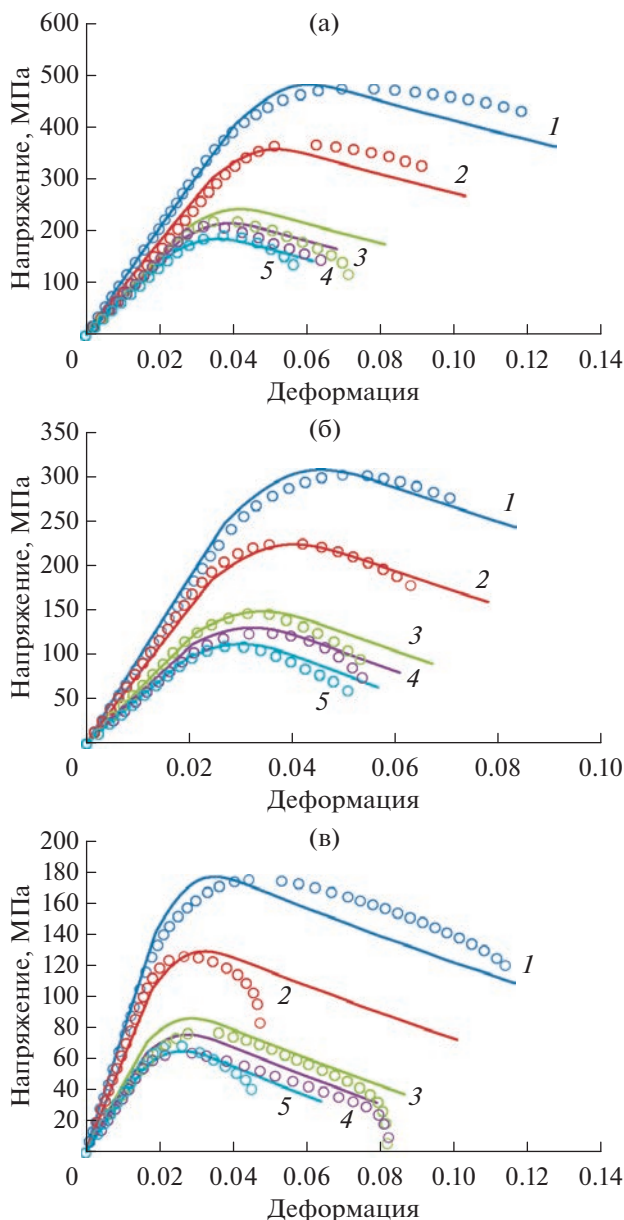


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные диаграммы дефор- мирования гранулированного никелевого сплава при различных температурах: (а) – $T = 1050^{\circ}\text{C}$, (б) – 1100, (в) – 1150; 1 – $\dot{\xi} = 32 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, 2 – 5.3×10^{-3} , 3 – 0.53×10^{-3} , 4 – 0.26×10^{-3} , 5 – 0.11×10^{-3} .

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 неизоотермическом 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. Nonisothermal 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.