

УДК 539.43

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-4-500-509

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ*

© 2023 г.

**Бондарь В.С.¹, Фомин Д.Ю.¹,
Ларионова О.Е.¹, Юдинцева А.И.²**

¹Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

tm@mospolytech.ru

Поступила в редакцию 03.09.2023

Представлены результаты математического моделирования процесса раскатки заготовки диска из жаропрочного никелевого сплава. Моделирование производится методом конечных элементов с использованием модели материала, разработанной на основе результатов испытаний образцов на сжатие и растяжение при температурах 1050, 1100 и 1150 °С и разных скоростях деформирования. Модель материала основана на положениях теории пластического течения при комбинированном упрочнении. Разработанная модель позволяет учитывать особенности деформирования материала, возникающие при его циклическом нагружении с переменной скоростью, в том числе изменение параметров материала при переходе от одной скорости к другой. Модель обобщена на случай неизотермического нагружения. Приведен метод идентификации параметров модели по результатам проведенных испытаний и получены материальные функции. Задача моделирования процесса раскатки решена в трехмерной постановке. Разработанная модель внедрена в программный комплекс SIMULIA Abaqus с помощью пользовательской подпрограммы. По результатам расчета получены картограммы остаточных напряжений, максимальных значений пластической деформации и значения перемещений в осевом и радиальном направлениях в конце процесса раскатки. Получена зависимость изменения пластической деформации в процессе раскатки в осевом и радиальном направлениях, на основании которой сделаны выводы об особенностях деформирования материала в процессе раскатки. Достоверность результатов математического моделирования деформирования и метода определения материальных функций подтверждена путем сравнения полученной в результате расчета формы диска с формой диска, полученной в процессе раскатки.

Ключевые слова: теория термояскопластичности, изотермическая раскатка, математическое моделирование, метод конечных элементов.

Введение

В настоящее время в практике проведения расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) широко используются программные комплексы,

*Выполнено при финансовой поддержке Государственного задания Минобрнауки России (проект №FSWR-2023-0036)

основанные на методе конечных элементов [1]. Они позволяют учитывать широкий ряд геометрических и других особенностей процесса деформирования, задавать реальную геометрию, условия контакта и различные модели поведения материала. Такие программные комплексы хорошо подходят для моделирования процесса изотермической раскатки, который характеризуется объемным НДС.

Сложность компьютерного моделирования процесса заключается в невозможности постановки как плоской, так и осесимметричной задачи из-за наличия постоянно смещающегося по спирали от центра заготовки к периферии локального очага деформации и присутствия внеконтактной деформации [2, 3]. При этом скорость деформации материала заготовки изменяется в процессе раскатки в широком диапазоне. В очаге деформации она максимальна и существенно (более чем на порядок) ниже, чем в его окрестностях. Кроме того, процесс деформирования имеет циклический характер, для моделирования которого необходимо использование специальных математических моделей. Математические модели деформирования [4–7], которые доступны для проведения расчета в существующих программных комплексах, позволяющие учитывать влияние скорости деформации на кинетику НДС, не предназначены для проведения расчетов циклических процессов.

1. Модель термовязкопластичности

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

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p. \quad (1)$$

Процесс деформирования зависит от изменения температуры T и скорости деформирования

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

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

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

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1}{E} [\dot{\sigma}_{ij} - \nu(3\dot{\sigma}_0\delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij})] + \alpha_{ij}^T \dot{T} + \alpha_{ij}^\xi \dot{\xi}, \quad (3)$$

$$\alpha_{ij}^T = \alpha_T \delta_{ij} - \frac{1}{E^2} [\sigma_{ij} - \nu(3\sigma_0\delta_{ij} - \sigma_{ij})] \frac{dE}{dT},$$

$$\alpha_{ij}^\xi = -\frac{1}{E^2} [\sigma_{ij} - \nu(3\sigma_0\delta_{ij} - \sigma_{ij})] \frac{dE}{d\xi},$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, $\sigma_0 = \sigma_{ii}/3$ – среднее напряжение, δ_{ii} – 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 виде:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* - C^2 = 0. \quad (4)$$

Здесь $s_{ij}^* = s_{ij} - a_{ij}$ – девиатор активных [8] напряжений; s_{ij} – девиатор напряжений. Тензор a_{ij} характеризует смещение поверхности нагружения в девиаторном пространстве напряжений. Скаляр C отвечает размеру поверхности нагружения.

Для радиуса поверхности нагружения принимается зависимость:

$$C = C_p(\varepsilon_{ii}^p, T, \xi), \quad (5)$$

$$\dot{C} = q_\xi \dot{\varepsilon}_{ii}^p + q_T \dot{T} + q_\xi \dot{\xi}. \quad (6)$$

Здесь $\varepsilon_{ii}^p = (2/3 \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p)^{1/2}$ – интенсивность скоростей неупругой деформации; ε_{ii}^p – накопленная неупругая деформация; $q_\varepsilon, q_T, q_\xi$ – определяющие функции, которые далее будут выражены через материальные функции.

Смещение поверхности нагружения определяется эволюционным уравнением Армстронга – Фредерика – Кадашевича [9, 10], обобщенным на неизотермическое [11–14] нагружение и переменную скорость деформирования:

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} g \dot{\varepsilon}_{ij}^p + g_a a_{ij} \dot{\varepsilon}_{ii}^p + g_a^T a_{ij} \dot{T} + g_a^\xi a_{ij} \dot{\xi}. \quad (7)$$

Здесь g, g_a, g_a^T, g_a^ξ – определяющие функции, которые выражаются [11, 12] через материальные функции:

$$g = \beta \sigma_a, \quad g_a = -\beta, \quad g_a^T = \frac{1}{\sigma_a} \frac{\partial \sigma_a}{\partial T}, \quad g_a^\xi = \frac{1}{\sigma_a} \frac{\partial \sigma_a}{\partial \xi}. \quad (8)$$

Неупругие деформации являются функционалами процесса нагружения и определяются на основе ассоциированного с поверхностью нагружения (4) закона течения:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_{ii}^*} \dot{\varepsilon}_{ii}^p, \quad \sigma_{ii}^* = \left(\frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Здесь σ_{ii}^* – интенсивность активных напряжений.

Скорость накопленной неупругой деформации при мягком и жестком режимах нагружения определяется [11, 12] выражением:

$$\dot{\varepsilon}_{ii}^n = \frac{1}{E_*} \left[\frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* \dot{\sigma}_{ij}^*}{\sigma_{ii}^*} - B^T \dot{T} + B^\xi \dot{\xi} \right] \text{ – мягкий режим}, \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ii}^n = \frac{1}{E_* + 3G} \left[3G \frac{s_{ij}^* (\dot{\varepsilon}_{ij} - \alpha_{ij}^T \dot{T} - \alpha_{ij}^\xi \dot{\xi})}{\sigma_{ii}^*} - B^T \dot{T} + B^\xi \dot{\xi} \right] \text{ – жесткий режим}, \quad (11)$$

$$E_* = q_\xi + g + g_a a_{ii}^*, \quad B^T = q_T + g_a^T a_{ii}^*, \quad B^\xi = q_\xi + g_a^\xi a_{ii}^*, \quad a_{ii}^* = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* a_{ij}}{\sigma_{ii}^*}.$$

Для неупругого состояния необходимо, чтобы изображающая точка процесса нагружения находилась на поверхности нагружения и определяемая скорость накопленной неупругой деформации была положительная, а упругое состояние следует при нарушении любого из двух условий:

$$\begin{aligned}
(\sigma_{ii}^* = C) \cap (\dot{\varepsilon}_{ii}^p > 0) & - \text{неупругое состояние,} \\
(\sigma_{ii}^* < C) \cup (\dot{\varepsilon}_{ii}^p \leq 0) & - \text{упругое состояние.}
\end{aligned}
\tag{12}$$

Здесь под $\dot{\varepsilon}_{ii}^p$ подразумевается выражение, задаваемое уравнением (10) либо (11) или любым другим уравнением, связывающим скорость накопленной неупругой деформации и любой набор скоростей напряжений и деформаций.

2. Материальные функции и метод их определения

Рассмотренный вариант теории термовязкопластичности замыкается материальными функциями $E(T, \xi)$, $C_p(\varepsilon_{ii}^p, T, \xi)$, $\sigma_a(T, \xi)$ и параметрами ν , β , $\alpha_T(T)$. Функции предлагается аппроксимировать выражениями:

$$E(T, \xi) = K_E(T) \xi^{n_E(T)}, \tag{13}$$

$$C_p(\varepsilon_{ii}^p, T, \xi) = E_C(T) \varepsilon_{ii}^p + C_0(T, \xi), \tag{14}$$

$$C_0(T, \xi) = K_C(T) \xi^{n_C(T)}, \tag{15}$$

$$\sigma_a(T, \xi) = K_a(T) \xi^{n_a(T)}. \tag{16}$$

Тогда определяющие функции имеют вид:

$$q_\varepsilon = \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{ii}^p} = E_C, \quad q_T = \frac{\partial C_p}{\partial T} = \frac{dE_C}{dT} \varepsilon_{ii}^p + \frac{\partial C_0}{\partial T}, \quad q_\xi = \frac{\partial C_0}{\partial \xi}. \tag{17}$$

Таким образом, на основе результатов экспериментов необходимо определить параметры $K_E(T)$, $n_E(T)$, $E_C(T)$, $K_C(T)$, $n_C(T)$, $K_a(T)$, $n_a(T)$, β .

Метод определения параметров гранулированного никелевого сплава основан на представлении экспериментальных данных в виде линейных зависимостей при использовании метода наименьших квадратов. Материальные параметры сплава найдены для температур 1050, 1100, 1150 °С по набору диаграмм растяжения при различных постоянных скоростях деформирования. Материальные параметры ν и $\alpha_T(T)$ взяты из справочной литературы.

Модуль упругости определяется традиционным способом: отношением приращения напряжений к приращению деформаций на начальном участке диаграммы деформирования. Параметры K_E и n_E определяются путем аппроксимации экспериментальной зависимости модуля упругости E от скорости деформации ξ степенной функцией (13) для каждой температуры. Для нахождения скорости изотропного упрочнения E_C диаграмма деформирования перестраивается в диаграмму неупругого деформирования. На построенных диаграммах неупругого деформирования присутствует линейный участок, наклон которого характеризует скорость изотропного упрочнения E_C . Начальный размер поверхности нагружения C_0 определяется напряжением, разделяющим область упругого и неупругого деформирования. Параметры K_C и n_C находятся из зависимости C_0 от ξ для каждой температуры. Для определения параметров анизотропного упрочнения σ_a и β из диаграммы неупругого деформирования вычитается функция (14) изотропного упрочнения и получается диаграмма изменения микронапряжений от неупругих деформаций. Далее полученная диаграмма перестраивается в координатах зависимости производной микронапряжения $da/d\xi^p$ от микронапряжения a . Аппроксимируя эту зависимость линейной функ-

цией, можно получить [15, 16] параметры σ_a и β . Параметры K_a и n_a определяются из зависимости σ_a от ξ для каждой температуры.

В таблице 1 приведены материальные параметры гранулированного никелевого сплава для трех уровней высоких температур. Для данных, приводимых в таблице 1, скорость деформирования ξ измеряется в 1/с.

Таблица 1

Материальные параметры гранулированного никелевого сплава									
$T, ^\circ\text{C}$	$K_E, \text{МПа}$	n_E	$K_C, \text{МПа}$	n_C	$E_C, \text{МПа}$	$K_a, \text{МПа}$	n_a	β	ν
1050	14000	0,0756	745	0,166	-1600	196	0,16	250	0,3
1100	14000	0,113	456	0,166	-1600	165	0,17	250	0,3
1150	12000	0,138	255	0,166	-780	92	0,173	250	0,3

3. Математическая модель процесса раскатки диска

Разработанная математическая модель деформирования материала, внедренная в пакет, предназначенный для проведения прочностных расчетов SIMULIA Abaqus [17–20], апробирована путем проведения математического моделирования процесса раскатки заготовки из никелевого жаропрочного сплава при температуре 1130 °С.

В процессе раскатки заготовка, зажата между двумя пинолями, вращается вокруг своей оси с заданной угловой скоростью $\omega_{\text{заг}}$. Материал заготовки прокатывается четырьмя деформирующими роликами, прижатыми к поверхности заготовки. Ролики перемещаются от оси вращения заготовки в радиальном направлении с постоянной линейной скоростью $V_{\text{ролл}} = 1,5$ мм/мин. Скорость вращения заготовки $\omega_{\text{заг}}$ в процессе раскатки не постоянна, ее значение контролируется так, чтобы линейная скорость $V_{\text{заг}}$ в очаге деформации составляла 300 мм/мин. После достижения роликами заданного радиального перемещения заготовка вращается еще несколько оборотов, после чего процесс раскатки считается завершенным. В численном расчете процесса для описания больших пластических и малых упругих деформаций используется стандартная модель с формулировкой в терминах текущего лагранжева подхода в скоростях [17–20]. Принимается аддитивность упругих и пластических тензоров деформаций скорости, при этом упругий тензор связывается линейно с производной Яумана тензора напряжений Кирхгофа, а пластический – с ассоциированным законом течения.

Конечно-элементная модель диска состоит из повторяющихся трехмерных элементов (рис. 1). Конечно-элементная модель раскатного ролика представляет собой абсолютно жесткую оболочку (рис. 2), повторяющую контур его рабочей поверхности.

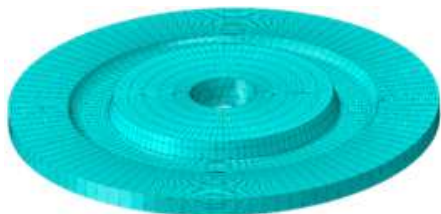


Рис. 1. Конечно-элементная модель заготовки диска



Рис. 2. Конечно-элементная модель ролика

Сборка, позволяющая моделировать процесс раскатки, состоит из заготовки и двух роликов. Между поверхностями диска и роликов создано условие абсолютно жесткого контакта. В модели заданы: условие симметрии заготовки относительно ее срединной плоскости; запрет перемещения опорной точки заготовки; запрет перемещения опорных точек роликов в направлении, перпендикулярном радиусу заготовки. Вращение заготовки осуществляется заданием опорной точке скорости вращения (рис. 3).

Ролики в процессе раскатки перемещаются от точки касания с заготовкой вдоль ее радиуса на расстояние 50 мм. Кроме того, для исключения ошибок при определении контактирующих узлов моделируется вращение роликов. Схема нагружения роликов показана на рис. 4.



Рис. 3. Схема вращения заготовки



Рис. 4. Схема нагружения роликов

Результаты моделирования процесса изотермической раскатки заготовки диска из жаропрочного никелевого сплава приведены на графиках, характеризующих процесс деформирования, и картограммах распределения параметров напряжений и деформаций в разные моменты процесса раскатки.

Для анализа формоизменения заготовки в процессе раскатки на рис. 5 приведены зависимости пластических деформаций элемента диска, с которым происходит контакт ролика в момент времени, равный 1 мин. Из рисунка видно, что элемент в начале процесса раскатки подвергается сжатию в радиальном направлении, после чего этот элемент смещается к кромке ролика и происходит изменение направления его деформирования – элемент сжимается в направлении оси заготовки и растягивается в радиальном направлении. Это свидетельствует о том, что процесс деформирования материала в процессе раскатки имеет сложный характер и для его моделирования необходимо использовать математические модели, основанные на теории течения с изотропно-кинематическим упрочнением [6].



Рис. 5. Изменение пластической деформации в процессе раскатки

Значительно большие значения пластической деформации реализуются в элементах кромки обода, где происходит касание с роликом. Это обусловлено формой заготовки, которая отличается от формы ролика (рис. 6). Такие деформации могут приводить к существенной неоднородности структуры заготовки.

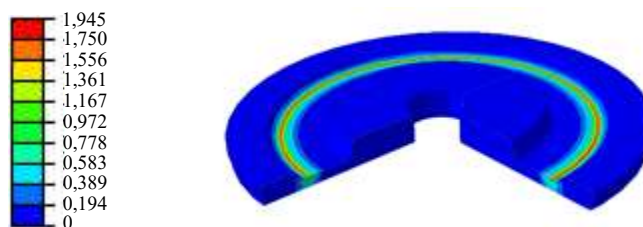


Рис. 6. Максимальное значение пластической деформации

Для верификации разработанной модели проведено сравнение размеров и формы заготовки после раскатки с размерами и формой заготовки, полученными путем математического моделирования процесса раскатки (рис. 7). Найденные значения перемещений свидетельствуют о возможности применения разработанной модели пластичности при математическом моделировании процессов изотермической раскатки дисков с использованием метода конечных элементов.

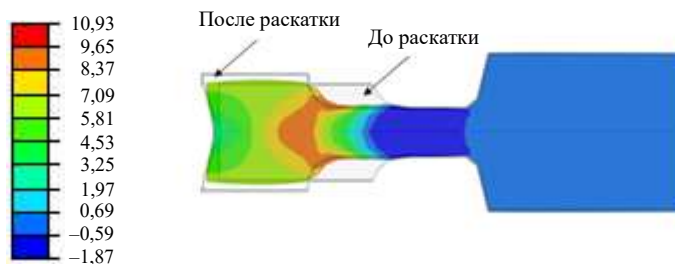


Рис. 7. Радиальные перемещения в конце процесса раскатки, мм

Заключение

На основании анализа результатов экспериментальных исследований разработана математическая модель деформирования материала, учитывающая ряд особенностей, возникающих в процессе раскатки заготовок из гранулированных никелевых сплавов. Модель внедрена в один из современных программных комплексов, основанный на методе конечных элементов. Проведено моделирование процесса изотермической раскатки диска, результаты которого позволили сделать вывод об адекватности разработанной модели.

Список литературы

1. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. *Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 347 с.
2. Бурлаков И.А., Морозов С.В., Боровских И.А. Расчет технологических параметров изотермической раскатки дисков газотурбинных двигателей. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. №2. С. 28–34.

3. Бурлаков И.А., Морозов С.В. Автоматическая линия для изотермической раскатки заготовок дисков газотурбинных двигателей. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. №5. С. 26–28.
4. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*. 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302. DOI: 10.1016/0749-6419(89)90015-6.
5. Chaboche J.L. Thermodynamically based viscoplastic constitutive equations: theory versus experiment. *ASME Winter Annual Meeting*. Atlanta, GA, USA. 1991. P. 1–20.
6. Chaboche J.L. Cyclic viscoplastic constitutive equations. Parts I and II. *ASME Journal of Applied Mechanics*. 1993. Vol. 60. P. 813–828.
7. Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. Iss. 10. P. 1642–1692. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.03.009>.
8. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. *Микронапряжения в конструкционных материалах*. Л.: Машиностроение, 1990. 222 с.
9. Armstrong P.J., Frederick C.O. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. *CEGB Report No RD/B/N/ 731*. Berkely, UK: Berkely Nuclear Laboratories, 1966.
10. Кадашевич Ю.И. О различных тензорно-линейных соотношениях в теории пластичности. *Исследования по упругости и пластичности*. 1967. Вып. 6. С. 39–45.
11. Бондарь В.С. Неупругое поведение и разрушение материалов и конструкции при сложном неизотермическом нагружении. *Дис. доктора физ.-мат. наук*. М., МАМИ. 1990. 314 с.
12. Bondar V.S. *Inelasticity. Variants of the Theory*. New York: Begell House, 2013. 194 p.
13. Бондарь В.С., Горячева И.Г., Матвиенко Ю.Г. и др. *Ресурс материалов и конструкций*. Ред. В.С. Бондарь. М.: Московский Политех, 2019. 192 с.
14. Бондарь В.С., Абашев Д.Р. Неупругое поведение и разрушение материалов при изотермических и неизотермических, простых и сложных нагружениях. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2020. №4. С. 107–119. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.10.
15. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Петров В.К. Сравнительный анализ вариантов теорий пластичности при циклических нагружениях. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2017. №2. С. 23–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.02.
16. Бондарь В.С., Абашев Д.Р. Прикладная теория неупругости. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2018. №4. С. 147–162. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.14.
17. *Abaqus/CAE. User Manual*, 2016.
18. *Abaqus Analysis User's Guide. Chapter 23.2.1*. Providence, RI, USA: Dassault Systemes, 2013.
19. *Abaqus Analysis User's Guide. Chapter 23.2.4*. Providence, RI, USA: Dassault Systemes, 2013.
20. Ahmad M.I.M., Curiel-Sosa J.L., Rongong J. Characterisation of creep behaviour using the power law model in copper alloy. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2017. Vol. 11. Iss. 1. P. 2503–2510. DOI:10.15282/jmes.11.1.2017.9.0230.

References

1. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. *Modelirovanie nelineynogo deformirovaniya i razrusheniya konstruktiv v usloviyakh mnogofaktornykh vozdeystviy na osnove MKE [Modeling of Nonlinear Deformation and Destruction of Structures under Conditions of Multifactorial Influences Based on FEM]*. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2015. 347 p. (In Russian).
2. Burlakov I.A., Morozov S.V., Borovskikh I.A. Raschet tekhnologicheskikh parametrov izotermicheskoy raskatki diskov gazoturbinykh dvigateley [Process parameters calculation for isothermal jet engines disks rolling]. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyeni*. 2010. No 2. P. 28–34 (In Russian).
3. Burlakov I.A., Morozov S.V. Avtomaticheskaya liniya dlya izotermicheskoy raskatki zagotovok diskov gazoturbinykh dvigateley [Automatic line for isothermal rolling of blanks of disks of gas turbine engines]. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyeni*. 2012. No 5. P. 26–28 (In Russian).
4. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Int. J. Plast.* 1989. Vol. 5. No 3. P. 247–302. DOI: 10.1016/0749-6419(89)90015-6.

5. Chaboche J.L. Thermodynamically based viscoplastic constitutive equations: theory versus experiment. *ASME Winter Annual Meeting*. Atlanta, GA, USA. 1991. P. 1–20.
6. Chaboche J.L. Cyclic viscoplastic constitutive equations. Parts I and II. *ASME Journal of Applied Mechanics*. 1993. Vol. 60. P. 813–828.
7. Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *Int. J. Plast.* 2008. Vol. 24. Iss. 10. P. 1642–1692. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.03.009>.
8. Novozhilov V.V., Kadashevich Yu.I. *Mikronapryazheniya v konstruktsionnykh materialakh* [*Micro-Stresses in Structural Materials*]. Leningrad. Mashinostroenie Publ. 1990. 222 p. (In Russian).
9. Armstrong P.J., Frederick C.O. A mathematical representation of the multiaxial Bauscinger effect. *CEGB Report No RD/B/N/ 731*. Berkely, UK. Berkely Nuclear Laboratories. 1966.
10. Kadashevich Yu.I. O razlichnykh tenzorno-lineynykh sootnosheniyakh v teorii plastichnosti [On various tensor-linear relations in the theory of plasticity]. *Issledovaniya po uprugosti i plastichnosti*. 1967. Iss. 6. P. 39–45 (In Russian).
11. Bondar V.S. Neuprugoe povedenie i razrushenie materialov i konstruktsii pri slozhnom neizotermicheskom nagruzhении [Inelastic behavior and destruction of materials and structures under complex non-isothermal loading]. *Dissertsiya doktora fiz.-mat. nauk* [*Dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences*]. Moscow. MAMI Publ. 1990. 314 p. (In Russian).
12. Bondar V.S. *Inelasticity. Variants of the Theory*. New York. Begell House. 2013. 194 p.
13. Bondar V.S., Goryacheva I.G., Matvienko Yu.G. et al. *Resurs materialov i konstruktsiy* [*Resource of Materials and Structures*]. Ed. V.S. Bondar. Moscow. Moskovskiy Politekh Publ. 2019. 192 p. (In Russian).
14. Bondar V.S., Abashev D.R. Neuprugoe povedenie i razrushenie materialov pri izotermicheskikh i neizotermicheskikh, prostykh i slozhnykh nagruzheniyakh [Inelastic behavior and destruction of materials under isothermal and non-isothermal, simple and complex loads]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [*PNRPU Mechanics Bulletin*]. 2020. No 4. P. 107–119. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.10 (In Russian).
15. Bondar V.S., Abashev D.R., Petrov V.K. Sravnitelnyy analiz variantov teorii plastichnosti pri tsiklicheskikh nagruzheniyakh [Comparative analysis of variants of plasticity theories under cyclic loading]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [*PNRPU Mechanics Bulletin*]. 2017. No 2. P. 23–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.02 (In Russian).
16. Bondar V.S., Abashev D.R. Prikladnaya teoriya neuprugosti [Applied theory of elasticity]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [*PNRPU Mechanics Bulletin*]. 2018. No 4. P. 147–162. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.14 (In Russian).
17. *Abaqus/CAE. User Manual*. 2016.
18. *Abaqus Analysis User's Guide. Chapter 23.2.1*. Providence, RI, USA. Dassault Systemes. 2013.
19. *Abaqus Analysis User's Guide. Chapter 23.2.4*. Providence, RI, USA. Dassault Systemes. 2013.
20. Ahmad M.I.M., Curiel-Sosa J.L., Rongong J. Characterisation of creep behaviour using the power law model in copper alloy. *J. Mech. Eng. Sci.* 2017. Vol. 11. Iss. 1. P. 2503–2510. DOI:10.15282/jmes.11.1.2017.9.0230.

SIMULATION OF THE ROLLING PROCESS*

Bondar V.S.¹, Fomin D.Yu.¹, Larionova O.E.¹, Yudintseva A.I.²

¹*Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation*

²*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

tm@mospolytech.ru

Received by the Editor 2023/09/03

The article presents the results of mathematical modeling of the process of rolling a heat-resistant nickel alloy disk blank. Modeling is carried out by the finite element method using a material model developed on the basis of the results of testing samples for compression and tension at temperatures of 1050, 1100 and 1150 °C and different strain rates. The material model is based on the theory of plastic flow with combined hardening. The developed model makes it possible to take into account the features of material deformation that occur during its cyclic loading at a variable speed, including the change in material parameters during the transition from one speed to another. The model is generalized to the case of non-isothermal loading. A method for identifying the parameters of the model is based on the results of the tests carried out and the obtained material functions are provided. The problem of the rolling process modeling is solved in a three-dimensional setting. To carry out the simulation, the developed model was introduced into the SimuliaAbaqus software package using a user subroutine. Based on the results of the calculation, cartograms of residual stresses, maximum values of plastic deformation, and values of displacements in the axial and radial directions at the end of the rolling process were obtained. The dependence of the change in plastic deformation in the process of rolling in the axial and radial directions is obtained, on the basis of which conclusions are drawn about the features of the deformation of the material in the process of rolling. The reliability of the results of mathematical modeling, the developed deformation model and the method for determining the material functions was confirmed by comparing the disk shape obtained as a result of the calculation with the disk shape obtained during the rolling process.

Keywords: theory of thermoviscoplasticity, isothermal rolling, mathematical modeling, finite element method.

* Completed with financial support by Government Contract of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No FSWR-2023-0036).