

Научная статья

УДК 539.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179677>

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА И УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ АВТОФРЕТИРОВАНИИ ТОЛСТОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА

Сергей Иванович Феоктистов¹, Иван Константинович Андрианов^{2✉},

Лин Тхет³

^{1,2,3}Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Комсомольск-на-Амуре, Россия

¹serg_feo@mail.ru

²ivan_andrianov_90@mail.ru✉

³linhtetnaining513028@gmail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема расчета толстостенных осесимметричных цилиндров в условиях гидравлического автофретирования внутренним давлением. Известные аналитические решения таких задач не учитывают условия возникновения вторичных пластических деформаций при разгрузке. Цель работы заключалась в оценке влияния эффекта Баушингера и упрочнения материала, а также геометрических параметров цилиндра и величины области пластичности в стенке цилиндрической оболочки на условия возникновения вторичных пластических деформаций при разгрузке. Рассмотрена модель поведения материала при знакопеременном нагружении с учетом гипотез и

допущений, принятых при решении задачи. Получено уравнение, позволяющее определить условия возникновения вторичных пластических деформаций в зависимости от перечисленных факторов.

Ключевые слова: вторичные пластические деформации, толстостенный цилиндр, автофретирование, линейное упрочнение, эффект Баушингера

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке «Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации» в рамках стипендии по проекту СП-2200.2022.5 «Разработка моделей и алгоритмов расчёта пластического формообразования заготовок штамповочного производства».

Для цитирования: Феоктистов С.И., Андрианов И.К., Тхет Л. Влияние эффекта Баушингера и упрочнения материала на возникновение вторичных пластических деформаций при автофретировании толстостенного цилиндра // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179677>

Original article

THE EFFECT OF THE BAUSCHINGER EFFECT AND MATERIAL HARDENING ON THE OCCURRENCE OF SECONDARY PLASTIC DEFORMATIONS DURING AUTOFRETTAGE OF A THICK-WALLED CYLINDER

Sergey I. Feoktistov¹, Ivan K. Andrianov²✉, Lin Htet³

^{1,2,3}Komsomolsk-na-Amure State University,

Komsomolsk-na-Amure, Russia

¹serg_feo@mail.ru

²ivan_andrianov_90@mail.ru✉

³linhtetnaining513028@gmail.ru

Abstract. The scientific research is devoted to the problem of calculating thick-walled axisymmetric cylindrical shells under conditions of hydraulic autofretting by internal pressure. The known analytical solutions to the problems of pipe autofretting in most cases do not take into account the conditions for the occurrence of secondary plastic strains during unloading. The purpose of this study was to evaluate the effect of the Bauschinger effect and material hardening, as well as the geometric parameters of the cylinder and the magnitude of the plasticity region in the wall of the cylindrical shell on the conditions of secondary plastic strains during unloading. The paper considers a model of the behavior of the material under alternating loading, taking into account the hypotheses and assumptions made in solving the problem. An equation is obtained that allows us to determine the conditions for the occurrence of secondary plastic strains depending on the listed factors. Within the framework of numerical calculations, it is concluded that the size of the plastic region in the cylinder wall has a significant effect on the occurrence of secondary plastic strains during autofretting. The results of numerical calculations for an ideal elastoplastic material are presented. According to the results of the study, with an increase in the hardening modulus and a decrease in the Bauschinger effect coefficient, the ratio of the outer radius of the cylinder to the inner one, at which secondary plastic deformations may occur during unloading during

autofretting, can significantly decrease, and with a decrease in the overvoltage coefficient – increase.

Keywords: secondary plastic strains, thick-walled cylinder, autofrettage, linear hardening, Bauschinger effect

Funding: the research was carried out with the financial support of the "Council for Grants of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists and state support of leading scientific schools of the Russian Federation" within the framework of a scholarship under the project SP-2200.2022.5 "Development of models and algorithms for calculating plastic shaping of blanks of stamping production".

For citation: Feoktistov S.I., Andrianov I.K., Htet L. The effect of the Bauschinger effect and material hardening on the occurrence of secondary plastic deformations during autofretting of a thick-walled cylinder. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179677>

Введение

На сегодняшний день одной из актуальных научных проблем представляется исследование упругопластического деформирования оболочечных элементов конструкций [1-4], среди которых особое внимание уделяется толстостенным оболочкам, которые применяются в авиационной промышленности в качестве сосудов под высоким давлением. С целью повышения прочностных характеристик толстостенных оболочек широкое

распространение получила технологическая процедура автофретирования [5-8]. Данная процедура представляет собой процесс создания остаточных напряжений в стенке толстостенной цилиндрической оболочки перед ее эксплуатацией, согласно которому на внутренней поверхности цилиндра создается и затем снимается соответствующее давление, достаточно большое для возникновения текучести в стенке. При этом нагружение может проводиться в упругопластической стадии, либо в случае, если интенсивность напряжений во всех точках стенки оболочки выше предела текучести. После снятия давления в стенке цилиндра возникают сжимающие остаточные окружные напряжения. Эти остаточные напряжения снижают растягивающие напряжения, возникающие в результате последующего приложения рабочего давления, что повышает несущую способность цилиндра [9]. Поскольку интенсивность напряжений в стенке цилиндрической оболочки при нагружении внутренним давлением достигает наибольшего значения на внутренней поверхности оболочки, соответственно на этой же поверхности при разгрузке могут возникнуть вторичные пластические деформации, что подтверждается различными исследователями [10-13].

Поскольку вторичные пластические деформации снижают эффект автофретирования и, соответственно, неблагоприятно влияют на прочностные характеристики толстостенных цилиндров, важно получить условия, при которых они могут возникнуть.

Большое влияние на возникновение вторичных пластических деформаций при разгрузке, кроме давления автофретирования и геометрических параметров

цилиндра, оказывают механические свойства материала, такие как эффект Баушингера и упрочнение [14]. Рассмотрим влияние этих факторов на возникновение вторичных пластических деформаций при автофретировании толстостенных цилиндров.

Поведение и моделирование материала при знакопеременном нагружении

При исследовании упругопластического деформирования толстостенного цилиндра в процессе автофретирования, будем использовать модель упругопластического материала с линейным упрочнением (рис. 1):

$$\sigma_i = \begin{cases} 3G e_i, & \text{при } e_i \leq e_{iT} \\ \lambda \sigma_{iT} + 3G(1 - \lambda) e_i, & \text{при } e_i > e_{iT}' \end{cases} \quad (1)$$

где G – модуль упругости II рода; $\lambda = 1 - E_T/3G$ – параметр, характеризующий упрочнение материала; $E_T = \tan \alpha'$ – модуль упрочнения; σ_{iT} – предел текучести материала; e_{iT} – интенсивность логарифмических деформаций, определяющая переход материала из стадии упругого деформирования в стадию пластического деформирования.

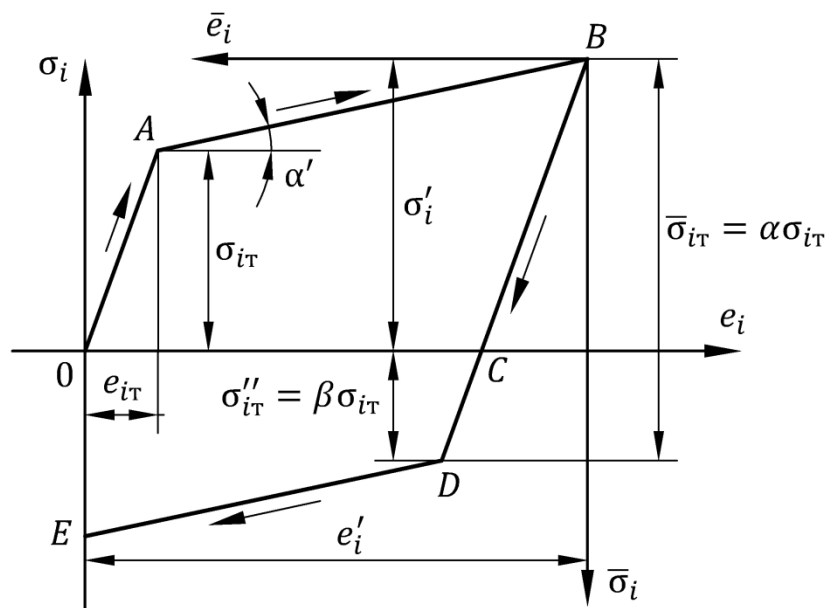


Рис. 1. Схематизация диаграммы знакопеременного деформирования упругопластического материала с линейным упрочнением

Если определять модуль упрочнения E_T по формуле $E_T = (\sigma_{iB} - \sigma_{i0,2}) / (e_{iB} - e_{i0,2})$, где σ_{iB} – истинное значение предела прочности материала; $\sigma_{i0,2}$ – истинное значение условного предела текучести; e_{iB} и $e_{i0,2}$ – соответствующие этим напряжениям интенсивности логарифмических деформаций, то, как показывают расчеты, параметр λ , характеризующий упрочнение материала, для большинства металлов изменяется в пределах 0,84...1,0. Причем $\lambda = 1,0$ соответствует идеальному упругопластическому материалу.

После растяжения образца изотропного материала до некоторой величины пластической деформации e'_i , характеризуемой точкой B (см. рис. 1), действующие напряжения в образце определяются как σ'_i . Если после такого растяжения полностью разгрузить образец (точка C), а затем сжать его, то тогда предел текучести σ''_{iT} при сжатии (см. рис.1), вследствие эффекта Баушингера, будет меньше чем первоначальный предел текучести σ_{iT} при растяжении [15].

Как показали многочисленные исследования [15-17], предел текучести σ''_{iT} при последующем сжатии будет уменьшаться тем в большей степени, чем выше были предшествующие деформации растяжения. Это уменьшение обычно характеризуется коэффициентом эффекта Баушингера $\beta = \sigma''_{iT} / \sigma_{iT}$. У большинства металлов коэффициент эффекта Баушингера в широком

диапазоне предшествующих деформаций растяжения может уменьшаться от 1,0 до 0,2 [18-20].

Если рассматривать ломаную BDE (см. рис. 1) как диаграмму повторного знакопеременного нагружения, то в соответствии с обобщенным принципом Мазинга [15] в координатах $\bar{\sigma}_i - \bar{e}_i$ можно записать:

$$\bar{\sigma}_i = \begin{cases} 3G\bar{e}_i, & \text{при } \bar{e}_i \leq \alpha e_{iT} \\ \alpha \left(\lambda \sigma_{iT} + 3G(1 - \lambda) \frac{\bar{e}_i}{\alpha} \right), & \text{при } \bar{e}_i > \alpha e_{iT} \end{cases}, \quad (2)$$

где α – обобщенный параметр Мазинга, который зависит от эффекта Баушингера и упрочнения материала.

Как следует из обобщенного принципа Мазинга, предел текучести при повторном знакопеременном нагружении определится как $\bar{\sigma}_{iT} = \alpha \sigma_{iT}$ (см. рис 1). Учитывая, что $\bar{\sigma}_{iT} = \sigma'_i + \sigma''_{iT}$, можно получить уравнение, связывающее обобщенный параметр Мазинга и коэффициент эффекта Баушингера:

$$\alpha = \beta + \frac{\sigma'_i}{\sigma_{iT}}. \quad (3)$$

В случае идеального эффекта Баушингера [9] обобщенный параметр Мазинга $\alpha = 2$. Подставляя это значение α в уравнение (3), получаем уравнение, определяющее значение коэффициента идеального эффекта Баушингера для упругопластического материала с линейным упрочнением в зависимости от величины предшествующие деформации растяжения:

$$\beta = 2 - \left(\lambda + \frac{3G}{\sigma_{iT}} (1 - \lambda) e'_i \right), \quad (4)$$

из которого следует, что, если материал идеальный упругопластический ($\lambda = 1$), то $\beta = 1$ и эффект Баушингера отсутствует.

Условия возникновения вторичных пластических деформаций

Для определения напряженного состояния при автофретировании толстостенного цилиндра воспользуемся решениями, изложенными в работах [9, 10, 15] по определению упругопластического состояния толстостенных цилиндров, нагруженных внутренним давлением и осевой силой при линейном упрочнении. Как показано в работе [9], если осевая сила возникает только за счёт давления на днище, что соответствует схеме автофретирования с продольным растяжением [9], осевая деформация цилиндра равна нулю ($e_z = 0$).

При автофретировании можно выделить два характерных давления. В первом случае определяем давление, когда на внутренней поверхности оболочки впервые возникают пластические деформации. Решая задачу Ламэ о толстостенной трубе с учётом сжимаемости материала, получим:

$$P'_{пл} = \sigma_{ит} \frac{(R_0^2 - r_0^2)}{\sqrt{3R_0^4 + (1 - 2\mu)^2 r_0^4}},$$

где R_0 – наружный радиус цилиндра; r_0 – внутренний радиус цилиндра; μ – коэффициент Пуассона. Как показали вычисления, влияние коэффициента Пуассона на значение давления $P'_{пл}$ для широкого диапазона толщин незначительное и лежит в пределах $(0,2...1,4)\%$, причём чем толще цилиндр, тем меньше погрешность, поэтому в дальнейших расчётах сжимаемость материала не учитываем:

$$P'_{пл} = \frac{\sigma_{iТ} (R_0^2 - r_0^2)}{\sqrt{3} R_0^2}, \quad (5)$$

Во втором случае определяем давление, при котором пластическая область охватывает всю стенку цилиндрической оболочки. Это давление будем рассматривать как максимальное давление автофретирования [15]:

$$P'_{max} = \frac{2\lambda\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} (1 - \lambda) \frac{(R_0^2 - r_0^2)}{r_0^2}. \quad (6)$$

Если при автофретировании в стенке цилиндра существует и упругая, и пластическая области, то требуемое давление можно определить по формуле [15]:

$$P' = \frac{2\lambda\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho_T}{r_0} + \frac{\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} \frac{\rho_T^2}{r_0^2} \left(1 - \lambda - \frac{r_0^2}{R_0^2} \right) + \frac{\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} \lambda, \quad (7)$$

где ρ_T – радиус поверхности, разделяющей упругую и пластическую области.

Для определения условий возникновения вторичных пластических деформаций введем новую переменную, характеризующую толщину рассматриваемого цилиндра и определяемую как отношение внешнего радиуса цилиндра к внутреннему: $H = R_0/r_0$.

Тогда формулы (5), (6) и (7), определяющие давления, примут вид:

$$P'_{пл} = \frac{\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{H^2} \right), \quad (8)$$

$$P'_{max} = \frac{2\lambda\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} \ln H + \frac{\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} (1 - \lambda) (H^2 - 1), \quad (9)$$

$$P' = \frac{2\lambda\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} \ln H_T + \frac{\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} H_T^2 \left(1 - \lambda - \frac{1}{H^2} \right) + \frac{\sigma_{iТ}}{\sqrt{3}} \lambda, \quad (10)$$

где $H = \rho_T/r_0$.

Согласно теореме о вторичных пластических деформациях [15], и рассматривая разгрузку как повторное знакопеременное нагружение, можно записать условие возникновения вторичных пластических деформаций при автофретировании:

$$P' \geq \alpha P'_{\text{пл}}, \quad (11)$$

где α – обобщенный параметр Мазинга (см. рис. 1).

Подставляя в уравнение (11) выражения (8) и (10), определяющие давления при автофретировании, получим условие возникновения вторичных пластических деформаций в самом общем случае для упругопластического материала с линейным упрочнением:

$$2 \lambda \ln H_T + H_T^2 \left(1 - \lambda - \frac{1}{H^2} \right) + \lambda - \alpha \left(1 - \frac{1}{H^2} \right) \geq 0. \quad (12)$$

Для определения H_T введём понятие коэффициента перенапряжения при автофретировании – k_T , который определяет положение поверхности, разделяющей пластическую и упругую области в долях толщины цилиндра

$$k_T = \frac{\rho_T - r_0}{R_0 - r_0}, \quad (13)$$

тогда $H_T = k_T H + (1 - k_T)$.

Если рассматривать критические условия, т.е. условия возникновения вторичных пластических деформаций, то уравнение (12) примет вид:

$$2 \lambda \ln \left(k_T H_{\text{кр}} + (1 - k_T) \right) + \left(k_T H_{\text{кр}} + (1 - k_T) \right)^2 \left(1 - \lambda - \frac{1}{H_{\text{кр}}^2} \right) + \\ + \lambda - \alpha \left(1 - \frac{1}{H_{\text{кр}}^2} \right) = 0. \quad (14)$$

Из уравнения (14) можно определить, при каком значении $H_{кр}$ могут возникнуть вторичные пластические деформации. Согласно уравнению (14), величина $H_{кр}$ зависит от величины пластической области при автофретитовании, определяемой переменной k_T , параметра упрочнения λ и параметра Мазинга α , который связан с коэффициентом эффекта Баушингера выражением (3). Уравнение (14) можно решить численно, задавая значения k_T , λ и α .

Графическая интерпретация численного решения в виде условия (11) представлена на рис. 2. В этом случае, определялась возможность появления вторичных пластических деформаций при максимальном давлении автофретитования ($k_T = 1$) для идеального упругопластического материала ($\lambda = 1$), при наличии идеального эффекта Баушингера ($\alpha = 2$).

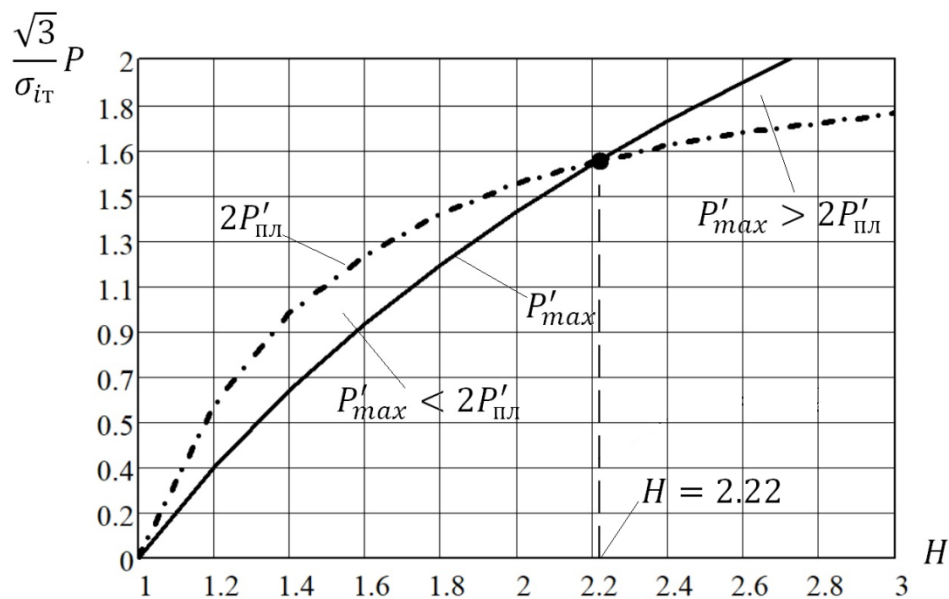


Рис. 2. Графическая интерпретация условия возникновения вторичных пластических деформаций

Как видно из графического решения, в цилиндре из идеального упругопластического материала возможно появление в процессе разгрузки вторичных пластических деформаций только в том случае, если отношение его внешнего радиуса к внутреннему превышает значения $H_{кр} = 2,22$. Этот результат полностью согласуется с решением, полученным В. В. Москвитиным в труде [15].

Результаты расчётов и их обсуждение

Для определения условий возникновения вторичной пластической деформации в процессе разгрузки при автофретировании, рассмотрим результаты расчётов изменения $H_{кр}$ в зависимости от упрочнения материала, характеризуемого параметром λ , при изменении параметра Мазинга α и коэффициента перенапряжения при автофретировании k_T .

На рис. 3 представлены результаты определения отношения внешнего радиуса цилиндра к внутреннему $H_{кр}$, при котором возникают вторичные пластические деформации в зависимости от изменения параметра Мазинга α при максимальном давлении автофретирования ($k_T = 1$).

Как видно из рис. 3, упрочнение материала и параметр Мазинга оказывают значительное влияние на условия возникновения вторичных пластических деформаций при автофретировании. В некоторых случаях отношение $H_{кр}$ может уменьшиться от 2,22 до 1,43.

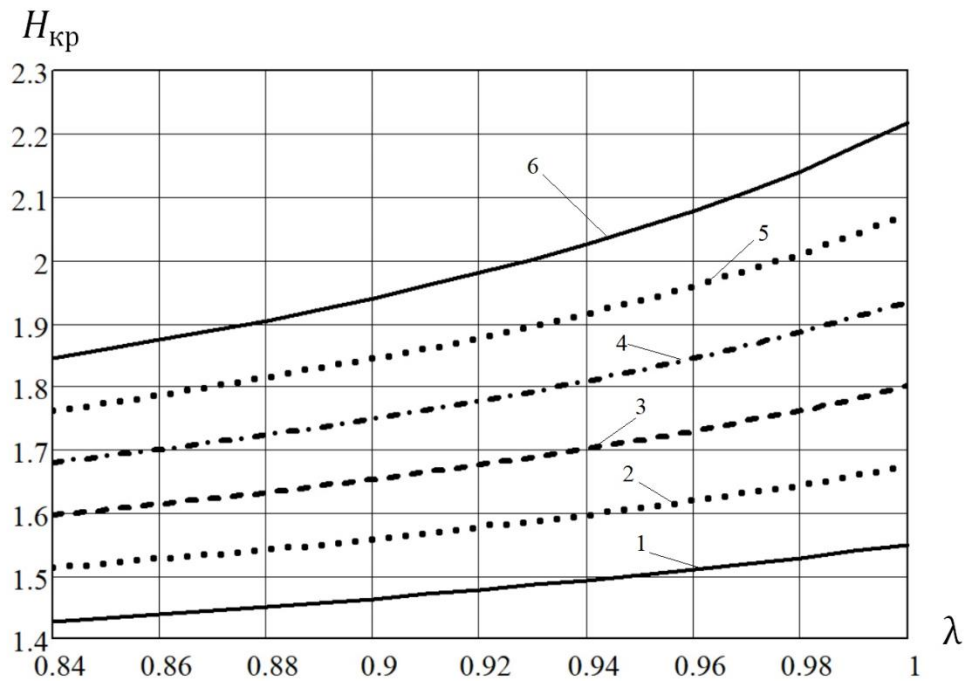


Рис. 3. Определение $H_{кр}$ в зависимости от λ при изменении параметра Мазинга α ($k_T = 1$):

1 – $\alpha = 1.5$, 2 – $\alpha = 1.6$, 3 – $\alpha = 1.7$, 4 – $\alpha = 1.8$, 5 – $\alpha = 1.9$, 6 – $\alpha = 2.0$

На рис. 4 представлены результаты определения отношения внешнего радиуса цилиндра к внутреннему $H_{кр}$, при котором возникают вторичные пластические деформации в зависимости от коэффициента перенапряжения при автофретировании k_T для идеального эффекта Баушингера ($\alpha = 2$).

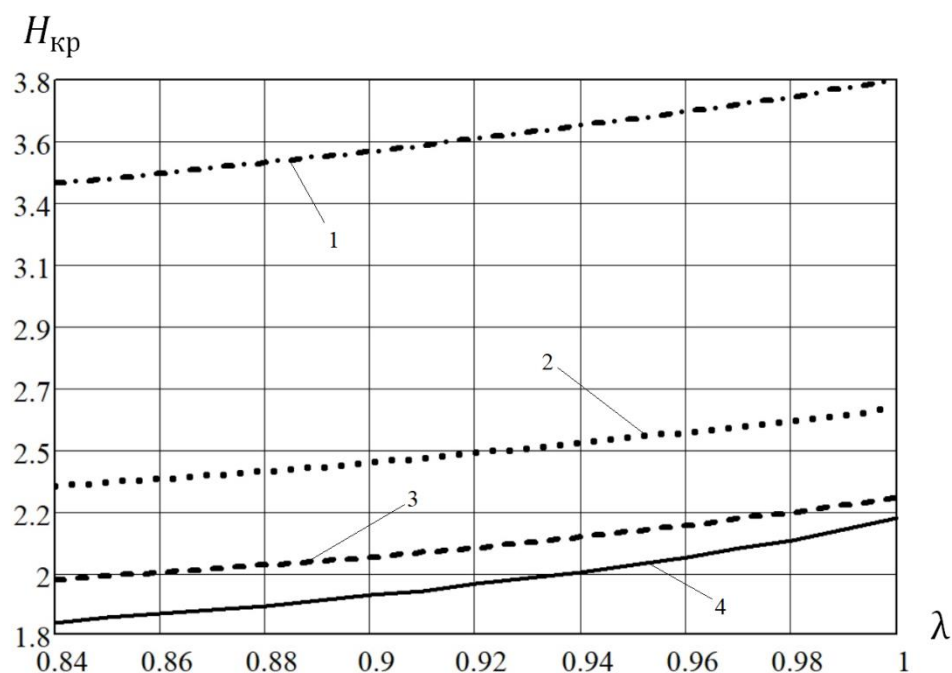


Рис. 4. Определение $H_{кр}$ в зависимости от λ при изменении

величины пластической области при автофретитовании k_T ($\alpha = 2$): $1 - k_T = 0.25$,

$$2 - k_T = 0.50, 3 - k_T = 0.75, 4 - k_T = 1.0$$

Как видно из рис. 4, величина пластической области в стенке цилиндра оказывает очень большое влияние на возникновение вторичных пластических деформаций при автофретитовании: при уменьшении коэффициента перенапряжения от 1,00 до 0,25, $H_{кр}$ для идеального упругопластического материала увеличивается от 2,22 до 3,80.

Заключение

Таким образом, согласно проведенным расчетам при увеличении модуля упрочнения E_T и уменьшении коэффициента эффекта Баушингера β , отношение внешнего радиуса цилиндра к внутреннему $H_{кр}$, при котором в процессе

разгрузки при автофретировании возможно появление вторичных пластических деформаций, может значительно уменьшиться, а при уменьшении коэффициента перенапряжения k_T – увеличиться.

Список источников

- 1.Нерубайло Б.В., Ву Б.З., Зайцев В.М. К расчету напряжений в цилиндрических сосудах при несимметричном гидростатическом давлении и нагреве // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=41554>
- 2.Бабайцев А.В., Бурцев А.Ю., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. Методика приближенной оценки напряжений в толстостенной осесимметричной композитной конструкции // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=107879>
- 3.Петров И.И., Сердюк Д.О., Скопинцев П.Д. Фундаментальные решения для ортотропной цилиндрической оболочки // Труды МАИ. 2022. № 124. – URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=167066>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-11)
- 4.Феоктистов С.И., Андрианов И.К., Марьин С.Б. Численно-аналитическая модель напряжённо-деформированного состояния при раздаче тонкостенных трубных заготовок в криволинейной осесимметричной матрице // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=176840>
- 5.Aziz Faruque, Kamal S.M., Perl Mordechai, Chetry Avinash. Increasing the load carrying capacity of hollow rotating disks by applying rotational autofrettage // European Journal of Mechanics- A/Solids, 2024, vol. 105, pp. 105231. DOI: [10.1016/j.euromechsol.2024.105231](https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105231)

- 6.Sun Lihua, Zhou Rongxuan, Li Guiqin, Li Jianing, Mitrouchev Peter. Simulation Research on Residual Stress of Swage Autofrettage-processed High-Pressure Cylinder // Journal of Physics: Conference Series, 2023, vol. 2587, pp. 012088. DOI: [10.1088/1742-6596/2587/1/012088](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2587/1/012088)
- 7.Aziz Faruque, Kamal S, Dixit Uday. Enhancing Fatigue Life of Thick-Walled Cylinders through a Hybrid Rotational-Swage Autofrettage-Induced Residual Stresses // Journal of Materials Engineering and Performance, 2024. DOI: [10.1007/s11665-023-09090-y](https://doi.org/10.1007/s11665-023-09090-y)
- 8.Chetry Avinash, Kamal S., Mehta Vivek. A Numerical Model for Rotational Autofrettage of Disks Based on von Mises Yield Criterion and Its Application in Strengthening Flanged Disks Used for Joining High Pressure Pipelines // International Journal of Applied Mechanics, 2022, vol. 15. DOI: [10.1142/S1758825123500229](https://doi.org/10.1142/S1758825123500229)
- 9.Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.
- 10.Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – Киев: Наукова думка, 1981. – 496 с.
- 11.Lee S.L. Residual stress analysis in swage autofrettaged thick-walled cylinders by position-sensitive x-ray diffraction techniques // ASMF International Conference on Pressure Vessels & Piping, Colorado, Technical report, 1993. pp. 1–15.
- 12.Huang X.P. A general autofrettage model of a thick-walled cylinder based on tensile–compressive stress–strain curve of a material // Submitted to Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2005, vol. 40 (6), pp. 599-607. DOI: [10.1243/030932405X1607](https://doi.org/10.1243/030932405X1607)

- 13.Kholdi M., Loghman A., Ashrafi H. Analysis of thick-walled spherical shells subjected to external pressure: Elastoplastic and residual stress analysis // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L. Journal of Materials Design and Applications, 2020, vol. 234 (I), pp. 186-197. DOI: [10.1177/1464420719882958](https://doi.org/10.1177/1464420719882958)
- 14.Chen P.C. The Bauschinger and hardening effect on residual stresses in an autofrettaged thick-walled cylinder // Pressure Vessel Technol, 1986, vol. 108 (1). pp. 108-112.
- 15.Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагружениях. – М.: Издательство МГУ, 1965. – 263 с.
- 16.Адигамов Р.Р., Андреев В.А., Рогачев С.О., Федотов Е.С., Хадеев Г.Е., Юсупов В.С. Проявление эффекта Баушингера при знакопеременной деформации // Известия высших учебных заведений: Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 455-466. DOI: [10.17073/0368-0797-2022-7-455-466](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-455-466)
- 17.Пыхтунова С.В. К вопросу об эффекте Баушингера // Качество в обработке материалов. 2015. № 1 (3). С. 75-77.
- 18.Дощинский Г.А., Ситникова Н.В. Определение величины эффекта Баушингера с ростом степени пластической деформации // Известия Томского политехнического института. 1976. Т. 224. С. 24-28.
- 19.Dell H.D., Eliseev V.V., Shapievskaaya V.A. Experimental Study of the Bauschinger Effect for Anisotropic Metals // Mechanics of Solids, 2014, vol. 49, no. 5, pp. 561–567.
- 20.Zhong Hu, Parker A.P. Implementation and validation of true material constitutive model for accurate modeling of thick-walled cylinder swage autofrettage //

International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2021. vol. 191. pp 104378. DOI: [10.1016/j.ijpvp.2021.104378](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104378)

References

1. Nerubailo B.V., Vu B.Z., Zaitsev V.M. *Trudy MAI*, 2013, no. 67. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=41554>
2. Babaitsev A.V., Burtsev A.Yu., Rabinskii L.N., Solyaev Yu.O. *Trudy MAI*, 2019, no. 107. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=107879>
3. Petrov I.I., Serdyuk D.O., Skopintsev P.D. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=167066>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-11)
4. Feoktistov S.I., Andrianov I.K., Mar'in S.B. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=176840>
5. Aziz Faruque, Kamal S.M., Perl Mordechai, Chetry Avinash. Increasing the load carrying capacity of hollow rotating disks by applying rotational autofrettage, *European Journal of Mechanics- A/Solids*, 2024, vol. 105, pp. 105231. DOI: [10.1016/j.euromechsol.2024.105231](https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105231)
6. Sun Lihua, Zhou Rongxuan, Li Guiqin, Li Jianing, Mitrouchev Peter. Simulation Research on Residual Stress of Swage Autofrettage-processed High-Pressure Cylinder, *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2587, pp. 012088. DOI: [10.1088/1742-6596/2587/1/012088](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2587/1/012088)
7. Aziz Faruque, Kamal S, Dixit Uday. Enhancing Fatigue Life of Thick-Walled Cylinders through a Hybrid Rotational-Swage Autofrettage-Induced Residual Stresses,

Journal of Materials Engineering and Performance, 2024. DOI: [10.1007/s11665-023-09090-y](https://doi.org/10.1007/s11665-023-09090-y)

8.Chetry Avinash, Kamal S., Mehta Vivek. A Numerical Model for Rotational Autofrettage of Disks Based on von Mises Yield Criterion and Its Application in Strengthening Flanged Disks Used for Joining High Pressure Pipelines, *International Journal of Applied Mechanics*, 2022, vol. 15. DOI: [10.1142/S1758825123500229](https://doi.org/10.1142/S1758825123500229)

9.Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* (Applied theory of plasticity and creep), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 399 p.

10.Pisarenko G.S., Mozharovskin N.S. *Uravneniya i kraevye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti* (Equations and boundary value problems of the theory of plasticity and creep), Kiev, Naukova dumka, 1981, 496 p.

11.Lee S.L. Residual stress analysis in swage autofrettaged thick-walled cylinders by position-sensitive x-ray diffraction techniques, *ASMF International Conference on Pressure Vessels & Piping*, Colorado, Technical report, 1993. pp. 1–15.

12.Huang X.P. A general autofrettage model of a thick-walled cylinder based on tensile–compressive stress–strain curve of a material, *Submitted to Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2005, vol. 40 (6), pp. 599-607. DOI: [10.1243/030932405X1607](https://doi.org/10.1243/030932405X1607)

13.Kholdi M., Loghman A., Ashrafi H. Analysis of thick-walled spherical shells subjected to external pressure: Elastoplastic and residual stress analysis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L. Journal of Materials Design and Applications*, 2020, vol. 234 (I), pp. 186-197. DOI: [10.1177/1464420719882958](https://doi.org/10.1177/1464420719882958)

- 14.Chen P.C. The Bauschinger and hardening effect on residual stresses in an autofrettaged thick-walled cylinder, *Pressure Vessel Technol*, 1986, vol. 108 (1). pp. 108-112.
- 15.Moskvitin V.V. *Plastichnost' pri peremennykh nagruzheniyakh* (Plasticity under variable loads), Moscow, Izdatel'stvo MGU, 1965, 263 p.
- 16.Adigamov R.R., Andreev V.A., Rogachev S.O., Fedotov E.S., Khadeev G.E., Yusupov V.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii: Chernaya metallurgiya*, 2022, vol. 65, no. 7, pp. 455-466. DOI: [10.17073/0368-0797-2022-7-455-466](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-455-466)
- 17.Pykhtunova S.V. *Kachestvo v obrabotke materialov*, 2015, no. 1 (3), pp. 75-77.
- 18.Doshchinskii G.A., Sitnikova N.V. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*, 1976, vol. 224, pp. 24-28.
- 19.Dell H.D., Eliseev V.V., Shapievskaia V.A. Experimental Study of the Bauschinger Effect for Anisotropic Metals, *Mechanics of Solids*, 2014, vol. 49, no. 5, pp. 561–567.
- 20.Zhong Hu, Parker A.P. Implementation and validation of true material constitutive model for accurate modeling of thick-walled cylinder swage autofrettage, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2021, vol. 191, pp 104378. DOI: [10.1016/j.ijpvp.2021.104378](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104378)

Статья поступила в редакцию 09.02.2024

Одобрена после рецензирования 16.02.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 09.02.2024; approved after reviewing on 16.02.2024; accepted for publication on 26.04.2024