

УДК 539.4.015/019

Л. В. Кукса, В. И. Клименко

СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТЫХ СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Получены зависимости критического напряжения от гибкости для стержней, упрочненных с помощью различного количества циклов деформационного старения. Исследовано изменение упругих свойств стали после пластического деформирования и деформационного старения. Показана необходимость изучения влияния текстуры на физико-механические свойства.

К л ю ч е в ы е с л о в а: устойчивость, критическое напряжение, сопротивляемость потере устойчивости, физико-механические свойства, наклеп, деформационное старение, модуль Юнга, текстура.

The dependences of critical stress on the flexibility of bars reinforced with different number of strain aging cycles are obtained. The change in the elastic properties of steel after plastic deformation and strain aging is investigated. The necessity to research the influence of the texture on physical and mechanical properties is shown.

Key words: stability, critical stress, loss of stability resistance, physical and mechanical properties, cold-hardening, strain aging, Young's modulus, texture.

Проблемы теории устойчивости, пластичности и ползучести взаимосвязаны и актуальны в механике деформируемого твердого тела. Их решение имеет большое научное и практическое значение для снижения удельной материалоемкости машин, аппаратов и конструкций, повышения их устойчивости, долговечности и надежности функционирования, создания новых технологий и др. [1]. Решение этих проблем требует разработки и применения различных методов, направленных на повышение сопротивляемости потере устойчивости стальных стержней, упрочненных различными способами.

Для повышения сопротивляемости потере устойчивости можно использовать различные методы. Для металлов (стали), деформирующихся с образованием площадки текучести, значения предела текучести σ_T , предела пропорциональности $\sigma_{пц}$ и предела упругости $\sigma_{уп}$ одинаковы [2]; т. е. $\sigma_T = \sigma_{пц} = \sigma_{уп}$, поэтому для определения значения гибкости λ_0 можно использовать условие

$$\sigma_{кр} \leq \sigma_T, \quad (1)$$

и тогда

$$\lambda_0 \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_T}}. \quad (2)$$

В этом случае зависимости критического напряжения от гибкости [2] можно представить в виде двух участков (рис. 1).

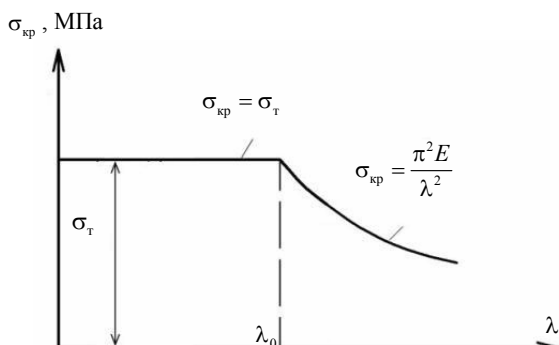


Рис. 1. Зависимость критического напряжения $\sigma_{кр}$ от гибкости λ для стали, деформирующейся с образованием площадки текучести, из двух участков

Для стержней с гибкостью $\lambda \leq \lambda_0$ критическое напряжение принимается равным пределу текучести σ_T .

Для повышения сопротивляемости потере устойчивости сжатых стальных стержней необходимо повысить значение критического напряжения, т. е. для участка с гибкостью $\lambda \leq \lambda_0$ увеличить предел текучести.

Увеличения предела текучести можно достичь применением многократной механико-термической обработки на основе деформационного старения [3, 4].

На рис. 2 показаны зависимости критического напряжения $\sigma_{кр}$ от гибкости λ для различного количества циклов деформационного старения. Из приведенных данных видна эффективность упрочняющей обработки. Критическое напряжение для стержней с гибкостью $\lambda \leq \lambda_0$ после проведения четырех циклов деформационного старения повышается более чем 50 %.

При значениях гибкости $\lambda \geq \lambda_0$ критическое напряжение определяется по формуле Эйлера (3) и зависит от модуля Юнга E (см. рис. 1):

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Поэтому представляет значительный интерес исследование изменения модуля Юнга при применении упрочняющих обработок после прохождения пластической деформации, а также после деформационного старения при проведении механико-термической обработки.

Интенсивность неупругих процессов изменится с ростом напряжения. Мгновенный модуль упругости E_m может быть определен по диаграмме деформаций или как первая производная [5]:

$$E_m = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cong \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (4)$$

где $\Delta\sigma$ — степень приращения напряжения; $\Delta\varepsilon$ — относительное удлинение, соответствующее ступени нагружения $\Delta\sigma$.

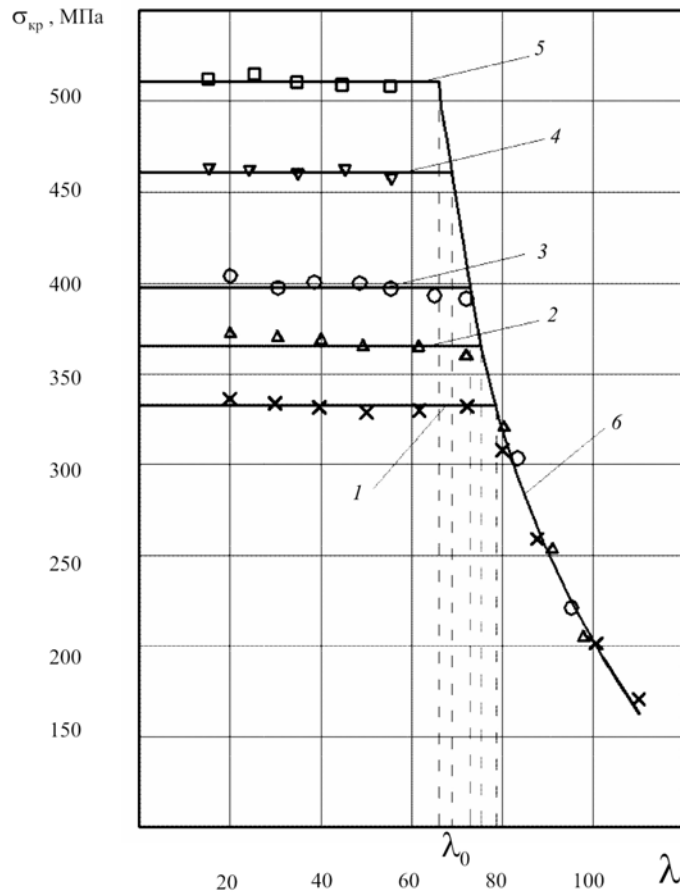


Рис. 2. Зависимости критических напряжений $\sigma_{кр}$ от гибкости λ для стали 20 в зависимости от количества циклов упрочнения: 1 — без упрочнения; 2, 3, 4, 5 — один, два, три, четыре цикла упрочнения соответственно; 6 — кривая $\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$; \times , Δ , \circ , ∇ , \square — экспериментальные точки

Для пластичных сталей диаграммы деформации, полученные в опытах на растяжение и сжатие, имеют одинаковый вид [6]. Поэтому физико-механические характеристики, полученные в опытах на растяжение, можно использовать для опытов на сжатие. Значения модуля Юнга E для пластичных материалов при растяжении и сжатии можно принять одинаковыми.

Было исследовано изменение мгновенного модуля упругости E_m стали 20 в зависимости от уровня напряжения: в исходном состоянии; в состоянии после прохождения фронта пластических деформаций на площадке текучести; после деформационного старения.

Для измерения деформаций при определении мгновенного модуля упругости E_m применялся коленчато-рычажный индикаторный тензометр [7], разработанный на кафедре сопротивления материалов ВолгГАСУ, позволяющий измерять деформацию с достаточно высокой точностью — до 0,1 мкм.

Сначала проводятся измерения деформации в образцах в процессе нагружения при напряжениях, не превышающих предела текучести (рис. 3, прямолинейный участок 1). Затем образцы нагружаются до усилия F_1 , превышающего силу F_T , соответствующую площадке текучести. После этого проводятся старения разной продолжительности и измеряются деформации в образцах при нагружении до силы F_1 .

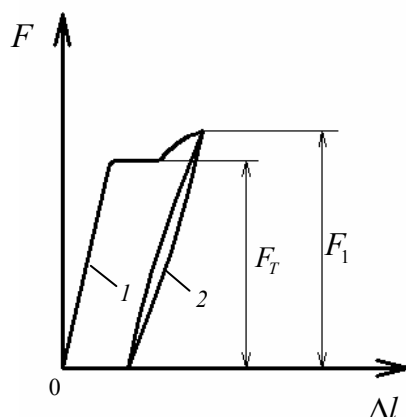


Рис. 3. Схема нагружения при определении мгновенного модуля упругости E_m : 1 — прямолинейный участок; 2 — петля упругого гистерезиса

На рис. 4 показаны результаты измерения модуля упругости E для стали 20 в процессе нагружения. В исходном состоянии значение модуля упругости $E = 210$ ГПа и не изменяется в процессе нагружения, если напряжение в образце не превышает значение предела текучести (см. рис. 4, прямая 1).

После прохождения фронта пластической деформации на площадке текучести наблюдается значительное изменение мгновенного модуля упругости E_m в процессе нагружения. Модуль упругости в этом состоянии зависит от напряжения в образце и уменьшается со значения 210 ГПа в начале нагружения, при напряжении близком к нулю, до 160 ГПа при напряжении 280 ГПа (см. рис. 4, прямая 2).

При нагружении образца до напряжения, не превышающего предел текучести, наблюдается прямолинейная зависимость σ — ϵ (рис. 5, позиция 1, справедлив закон Гука). После пластического деформирования при нагружении образца наблюдается петля упругого гистерезиса (см. рис. 4, позиция 2; рис. 5, позиция 2), подтверждающая изменение мгновенного модуля упругости E_m . Необходимо отметить, что уменьшение значения модуля упругости E после пластического деформирования может привести к снижению критического напряжения $\sigma_{кр}$ при гибкости $\lambda \geq \lambda_0$, когда справедлива формула Эйлера.

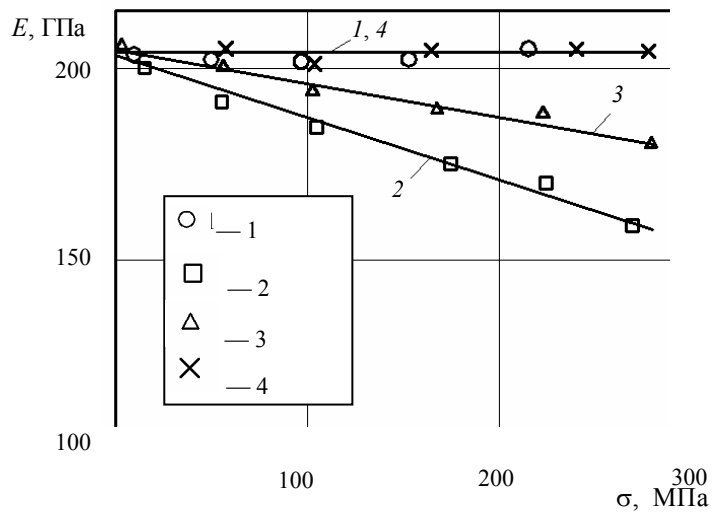


Рис. 4. Изменение мгновенного модуля Юнга E_m стали 20: 1 — в исходном состоянии при напряжениях, не превышающих значение предела текучести; 2 — после прохождения фронта пластической деформации на площадке текучести; 3 — после деформационного старения при температуре 150 °С в течение 15 мин; 4 — после деформационного старения при температуре 150 °С в течение 60 мин

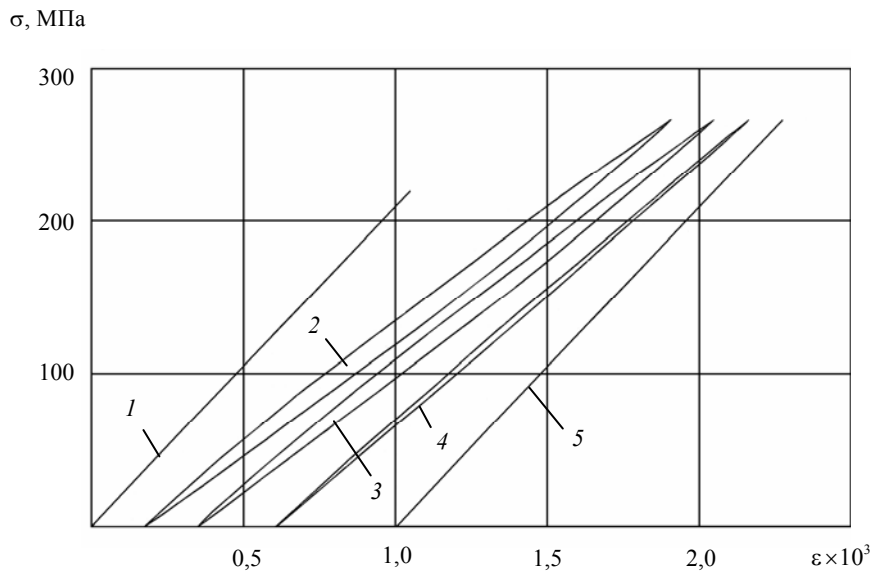


Рис. 5. Зависимость σ — ϵ при вычислении мгновенного модуля упругости: 1 — при напряжениях, не превышающих предел текучести; 2 — после пластического деформирования; 3, 4, 5 — после старения в течение 5, 15 и 60 мин соответственно

После проведения неполного старения при температуре 150 °С в течение 15 мин наблюдается повышение значения мгновенного модуля упругости E_m (см. рис. 4, прямая 3). Проведение старения в течении 5 и 15 мин приводит

к уменьшению петли упругого гистерезиса соответственно (см. рис. 5, позиции 3, 4). После проведения дополнительного старения при температуре 150°C в течение 45 мин упругие свойства материала полностью восстанавливаются до исходных значений (см. рис. 4, прямая 4), а петля упругого гистерезиса исчезает (см. рис. 4, позиция 5). Вновь значение мгновенного модуля упругости равняется 210 ГПа и не изменяется в процессе нагружения. Таким образом, применение деформационного старения приводит к полному исчезновению петли упругого гистерезиса.

Если учесть, что модуль Юнга E меняется в процессе нагружения линейно в зависимости от текущего напряжения, то можно отобразить изменение критического напряжения $\sigma_{\text{кр}}$ для участка с гибкостью $\lambda \geq \lambda_0$ (рис. 6). Кривая 1 отображает гиперболу Эйлера, а кривая 2 — гиперболу Эйлера с учетом изменения (уменьшения) значения модуля упругости E . Из рис. 6 видно, что после наклепа происходит снижение критического напряжения (кривая 2).

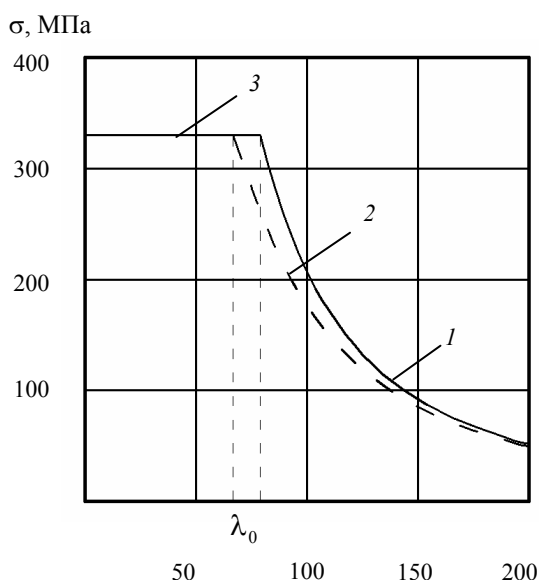


Рис. 6. Зависимость критического напряжения от гибкости для стали 20 после пластического деформирования: 1 — гиперболу Эйлера; 2 — гиперболу Эйлера с учетом изменения модуля упругости E ; 3 — прямая $\sigma_{\text{кр}} = \sigma_{\tau}$

Из рис. 4, 5, 6 видно, что для стержней с гибкостью $\lambda \geq \lambda_0$ проведение упрочнения с помощью наклепа приводит к снижению модуля упругости E и критического напряжения $\sigma_{\text{кр}}$, а также к уменьшению значения λ_0 .

Проведение старения в течение 60 мин восстанавливает значение модуля упругости E до исходных значений и, соответственно, снижения критического напряжения не происходит. Следовательно, упрочнение с помощью деформационного старения в сравнении с наклепом приводит к большему значению критического напряжения и сопротивляемости потере устойчивости для стержней с гибкостью $\lambda \geq \lambda_0$.

Представляет большой интерес изучение влияния на упругие свойства стали ориентации кристаллов относительно преимущественного направления (текстуры). На рис. 7 представлен наиболее распространенный случай ориентации кристаллов с гранецентрированной кубической решеткой в направлении $[010]$ диагонали грани куба [8].

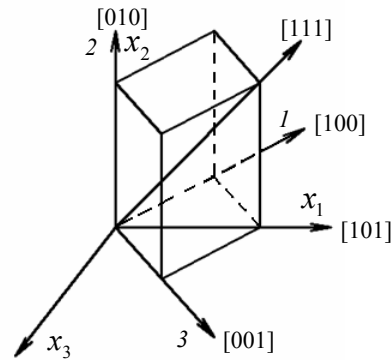


Рис. 7. Ориентировка кристалла: x_1, x_2, x_3 — лабораторные оси координат; 1, 2, 3 — кристаллографические оси

На рис. 8 представлено изменение модуля упругости в зависимости от направления в полярных координатах [9]. Кристаллы железа обладают ярко выраженной анизотропией упругих свойств (рис. 8, позиция 1). Минимальное значение модуля упругости E наблюдаются в направлениях ребра грани куба $[100]$ и $[001]$ и составляют $E_{\min} = 131,2$ ГПа, а максимальное — в направлении диагонали куба $[111]$ $E_{\max} = 263,5$ ГПа [10].

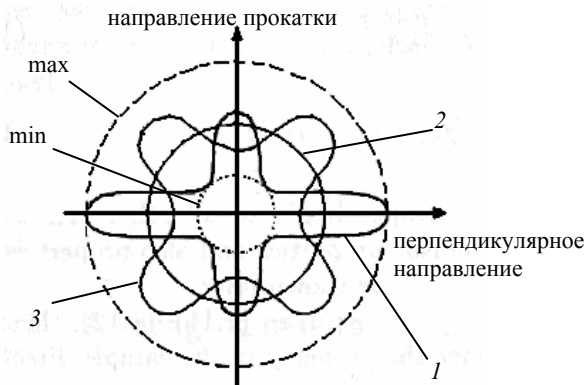


Рис. 8. Изменение упругих свойств кубических кристаллов технически чистого железа в зависимости от направления в плоскости прокатки: 1 — монокристалл; 2 — случайное расположение кристаллов; 3 — текстура прокатки

При случайном расположении отдельных кристаллов происходит выравниванию упругих свойств в поликристалле. Модуль упругости E во всех направлениях принимает одинаковое значение (см. рис. 8, позиция 2).

При рассмотрении текстуры поликристаллов железа наиболее распространенным принимается преимущественное направление [101] в плоскости прокатки {010} (по диагонали грани куба) [8]. В процессе деформации кристаллы выстраиваются таким образом, что грань куба кристалла совпадает с преимущественным направлением. Такое расположение кристаллов приводит к текстуре прокатки (см. рис. 8, позиция 3).

Если добиться того, чтобы сжатие текстурированного образца происходило в направлении максимального модуля упругости, то для участка с гибкостью $\lambda \geq \lambda_0$ должно иметь место повышение сопротивляемости потере устойчивости. Поэтому вопросы рассмотрения устойчивости сжатых стержней с учетом изменения модуля упругости E в зависимости от текстуры требуют дальнейших исследований.

В заключении необходимо отметить, что с помощью изменения физико-механических свойств стали путем применения упрочняющей обработки на основе деформационного старения можно добиться значительного повышения критического напряжения $\sigma_{кр}$ для участка с гибкостью $\lambda \leq \lambda_0$ и восстановления исходных значений модуля Юнга E для участка с гибкостью $\lambda \geq \lambda_0$ после его снижения при пластическом деформировании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубчанинов В. Г. Устойчивость и пластичность. Тверь : ТГТУ, 2006. Кн. 3. 400 с.
2. Кукса Л. В., Клименко В. И. Устойчивость сжатых стержней в зависимости от повышения физико-механических свойств упрочненных конструкционных материалов // Вестн. ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 28(47). С. 67—75.
3. Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали. М. : Металлургия, 1972. 320 с.
4. Кукса Л. В., Клименко В. И. Сравнительные исследования устойчивости сжатых стальных стержней в состоянии после нормализации и механико-термической обработки // Изв. ВолгГТУ. Сер.: Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2012. Вып. 6. № 9(96). С. 109—113.
5. Гурьев А. В., Кукса Л. В. Исследование границы раздела упругой и пластической деформации в стали // Физика металлов и металловедение. 1966. Т. 21. Вып. 1. С. 116—124.
6. Гурьев А. В., Кукса Л. В. О построении действительной кривой упрочнения металлов по испытаниям на растяжение и сжатие // Заводская лаборатория. 1964. Т. 30. Вып. 10. С. 1258—1259.
7. Коленчато-рычажный индикаторный тензометр : пат. № 2350898 Рос. Федерация / Кукса Л. В., Черепенников А. В. — зарег. 27.03.2009, Бюл. № 9.
8. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М. : Мир, 1972. 480 с.
9. Bunge H. J. Physical Properties of Textured Materials. GERMANY : Technical University of Clausthal, 1993. 150 p.
10. Кукса Л. В., Клименко В. И. Формирование матрицы упругих свойств конструкционных материалов с учетом текстуры // Изв. ВолгГТУ. Сер.: Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2008. Вып. 2. № 10(48). С. 123—126.

1. Zubchaninov V. G. Ustoychivost' i plastichnost'. Tver' : TGTU, 2006. Kn. 3. 400 s.
2. Kuksa L. V., Klimenko V. I. Ustoychivost' szhatykh sterzhney v zavisimosti ot povysheniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv uprochnennykh konstruktсионnykh materialov // Vestn. VolgGASU. Ser.: Str-vo i arkhит. 2012. Vyp. 28(47). S. 67—75.
3. Babich V. K., Gul' Yu. P., Dolzhenkov I. E. Deformatsionnoe starenie stali. M. : Metallurgiya, 1972. 320 s.
4. Kuksa L. V., Klimenko V. I. Sravnitel'nye issledovaniya ustoychivosti szhatykh stal'nykh sterzhney v sostoyanii posle normalizatsii i mekhaniko-termicheskoy obrabotki // Izv. VolgGTU. Ser.: Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii. 2012. Vyp. 6. № 9(96). S. 109—113.

5. Gur'ev A. V., Kuksa L. V. Issledovanie granitsy razdela uprugoy i plasticheskoy deformatsii v stali // Fizika metallov i metallovedenie. 1966. Т. 21. Вып. 1. S. 116—124.
6. Gur'ev A. V., Kuksa L. V. O postroenii deystvitel'noy krivoy uprochneniya metallov po ispytaniyam na rastyazhenie i szhatie // Zavodskaya laboratoriya. 1964. Т. 30. Вып. 10. S. 1258—1259.
7. Kolenchato-rychazhnyy indikatornyy tenzometr : pat. № 2350898 Ros. Federatsiya / Kuksa L. V., Cherepennikov A. V. — zareg. 27.03.2009, Byul. № 9.
8. Khonikomb R. Plasticheskaya deformatsiya metallov. M. : Mir, 1972. 480 s.
9. Bunge H. J. Physical Properties of Textured Materials. GERMANY : Technical University of Clausthal, 1993. 150 p.
10. Kuksa L. V., Klimenko V. I. Formirovanie matritsy uprugikh svoystv konstruktsionnykh materialov s uchetom tekstury // Izv. VolgGTU. Ser.: Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii. 2008. Вып. 2. № 10(48). S. 123—126.

© Кукса Л. В., Клименко В. И., 2013

*Поступила в редакцию
в сентябре 2013 г.*

Ссылка для цитирования:

Кукса Л. В., Клименко В. И. Сопротивляемость потере устойчивости сжатых стальных стержней в зависимости от изменения физико-механических свойств // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/KuksaKlimenko-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/KuksaKlimenko-2013_2(27).pdf)