

УДК 539.4.0144.13

doi: 10.18698/0536-1044-2019-2-34-39

Моделирование процесса упрочнения заготовки кручением

С.И. Каратушин¹, Д.А. Храмова¹, Ю.А. Плешанова²

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

² ЗАО «НПО специальных материалов»

Hardening by Torsion and Process Modelling

S.I. Karatushin¹, D.A. Khramova¹, Y.A. Pleshanova²

¹ Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov

² ZAO Research and Production Amalgamation for Special Materials

Проведены моделирование в среде ANSYS Workbench и экспериментальное исследование процесса упрочнения деформацией кручения в сочетании с термической обработкой заготовки круглого сечения. Упрочнение кручением создает на поверхности заготовки сжимающие напряжения и одновременно приводит к деформационному упрочнению по дислокационному механизму. Сформированное напряженно-деформированное состояние является благоприятным для витков цилиндрической пружины, так как снижает на их поверхности напряжения от внешней нагрузки. В отличие от процесса упрочнения патентированием деформация кручением не приводит к уменьшению диаметра заготовки, и упрочнение по сечению распределяется в соответствии со значением крутящего момента. Рассмотренный механизм упрочнения может быть применен для торсионов, заменив собой дробеметный наклеп и обкатку роликом.

Ключевые слова: упрочнение кручением, ANSYS Workbench, остаточные напряжения, патентирование

This work describes an experimental study and simulation of the process of hardening by torsion in combination with heat treatment for workpieces with round cross section using in ANSYS Workbench. Hardening by torsion creates compressive stresses on the workpiece surface and simultaneously leads to strain hardening by the dislocation mechanism. The formed stress-strain state is favorable for coils of cylindrical springs as it reduces the stress on the surface of the coils from an external load. In contrast to the process of hardening by patenting, torsional deformation does not reduce the diameter of the workpiece and hardening over the cross section is distributed in accordance with the amount of torque. The hardening mechanism examined in this work can be applied to torsion rods, thus replacing shot peening and roller burnishing.

Keywords: hardening by torsion, ANSYS Workbench, residual stresses, patenting

Пластическую деформацию уже давно используют для упрочнения металлов и сплавов. Эффективность этого метода зависит от вида деформации и обработки, в том числе термической (ТО), сочетаемой с пластической деформацией.

Самым эффективным методом упрочнения является патентирование. Однако, несмотря на

отработанность этой технологии, она имеет такой недостаток, как деформация волочением с большими степенями применительно к высокоуглеродистой стали. Это приводит к зависимости упрочнения от диаметра заготовки (проволоки), т. е. чем меньше конечный диаметр, тем лучше эффект упрочнения. Патентирование неприменимо для проволоки диаметром

более 6 мм и для торсионов. В основном торсионы имеют больший диаметр, и их дробебетное упрочнение совместно с обкаткой роликами малотехнологично и далеко не всегда дает нужные результаты. В перечисленных методах в основном задействован дислокационный механизм упрочнения.

В последнее время повышенный интерес у исследователей вызывает упрочнение сдвиговой деформацией. Изучается влияние деформации кручения на упрочнение изделий из чистых металлов [1, 2], аустенитных сталей с иницированием мартенситного превращения [3], а также из перлитных сталей [4, 5]. Отмечается разупрочнение [4] при циклическом кручении. Во всех перечисленных работах не рассматривается ТО, свойственная процессу патентирования, и не уделяется должного внимания остаточным напряжениям (ОН). В связи с этим представляет интерес рассмотреть упрочнение изделия деформацией кручения.

Цель исследования — изучение упрочнения заготовки сдвиговой деформацией с последующей ТО.

Поставленная задача решена на примере деформации кручением. Этот вид деформации применяют в сочетании с растяжением, например, для упрочнения длинномерных изделий [6–8]. Кручение происходит по механизму чистого сдвига, при котором генерируется большое количество дислокаций [9]. Кроме того,

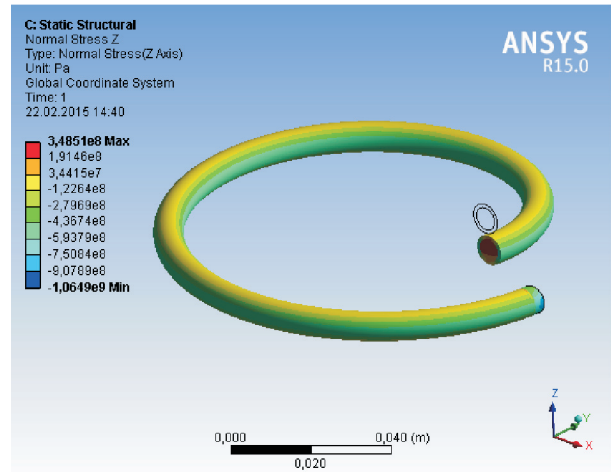
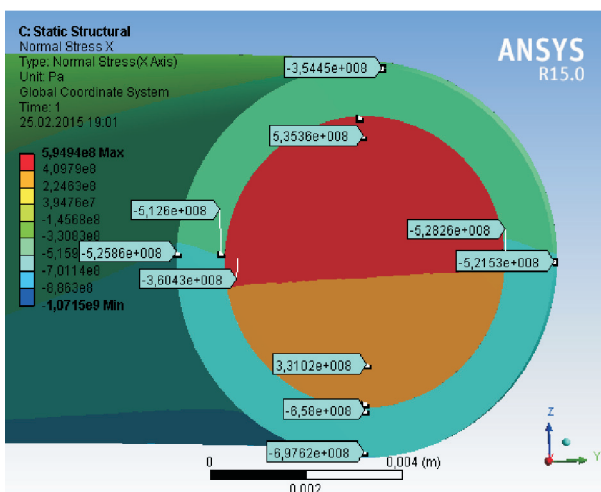


Рис. 1. Распределение ОН, Па, в сечении витка цилиндрической пружины из проволоки диаметром 6 мм

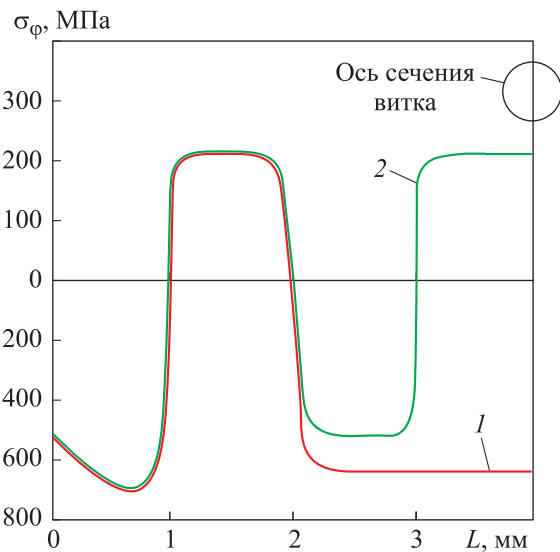
кручение создает неоднородную деформацию по сечению и, как следствие, приводит к появлению ОН [1, 3] — сжимающих напряжений на поверхности изделия.

Распределение ОН в сечении витка цилиндрической пружины из проволоки диаметром 6 мм можно рассчитать как аналитическим методом, так и в программном комплексе ANSYS Workbench (рис. 1).

В качестве примера на рис. 2, а приведено распределение нормальных осевых напряжений в витке пружины, а на рис 2, б — распре-



а



б

Рис. 2. Распределение ОН в сечении витка пружины: а — нормальных осевых (Normal Stress), Па; б — тангенциальных σ_ϕ под нагрузкой (1) и без нее (2)

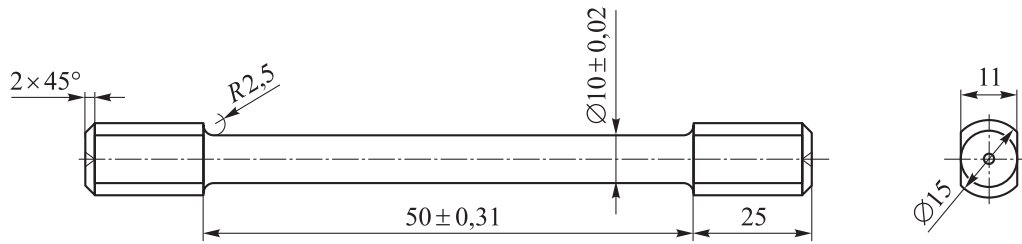


Рис. 3. Эскиз образца для испытаний

ление тангенциальных напряжений в витке пружины под нагрузкой и без нее, где L — расстояние от поверхности витка проволоки до оси его сечения.

На поверхности витка пружины это сжимающие ОН, а в сердцевине — растягивающие ОН. График изменения тангенциальных ОН в сечении витка под нагрузкой и без нее приведен на рис. 2, б. Так как витки при нагрузке пружины подвергаются не только кручению, но и изгибу, в середине сечения витка происходит компенсация растягивающих напряжений.

Любые методы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) не моделируют упрочнение при упругопластическом деформировании, вызываемое генерацией дислокаций и других дефектов кристаллического строения. В частности, при кручении упрочнение заготовок или готовых изделий типа торсионов происходит как по дислокационному механизму, так и вследствие возникновения ОН. Интенсивная деформация приводит к существенным структурно-фазовым изменениям [1, 2, 4, 5, 10–14]. Немаловажную роль играет и ТО, аналогичная обработке, применяемой при патентировании.

Для оценки влияния всех факторов, способствующих упрочнению при кручении, выполнено экспериментальное исследование образцов, выполненных из стали, имеющей следующий химический состав, мас. %: С — 0,71...0,82; Mn — 0,75...1,25; Si — 0,25...0,60; V — 0,03...0,15; Cr — менее 0,20; S и P — менее 0,02.

Исследование проводили следующим образом. Образцы закручивали на машине кручения с промежуточной ТО (нагрев до 300 °С с выдержкой 1 ч) и испытывали на растяжение.

Используемая сталь по составу и структуре соответствует сталям, широко применяемым для патентирования. Эскиз образца показан на рис. 3.

При изучении особенностей эффекта Баушингера [10, 11] установлено, что многократное циклическое кручение без промежуточной ТО

приводит к разупрочнению, а применение ТО — к упрочнению. Эффект упрочнения проявляется в увеличении крутящего момента, предел текучести становится равным пределу прочности. При предельной деформации разрушение происходит путем среза.

В результате предварительных экспериментов для выбранной стали принята следующая схема упрочнения: кручение на 180° — ТО — кручение на 80° — ТО — испытание на растяжение. На рис. 4 приведена первичная диаграмма кручения образца на различных этапах схемы упрочнения, представленная в виде зависимости крутящего момента $M_{кр}$ от угла закручивания φ . На рис. 5 представлена первичная диаграмма растяжения упрочненного образца в виде зависимости нагрузки P от удлинения образца Δl . При кручении по выбранной схеме не происходит изменения размеров, формы и шероховатости поверхности.

В отличие от патентирования при упрочнении кручением реализуется деформация чистого сдвига, а при последующих стандартных ис-

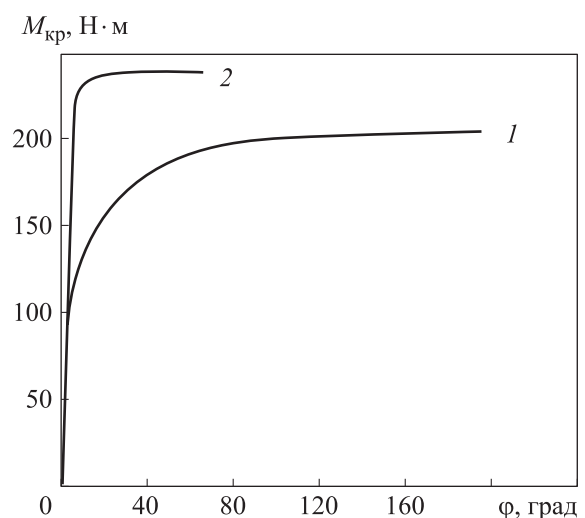


Рис. 4. Первичная диаграмма кручения образца на различных этапах схемы упрочнения:
1 — кручение на 180° по ходу часовой стрелки — ТО,
2 — кручение на 80° против хода часовой стрелки — ТО

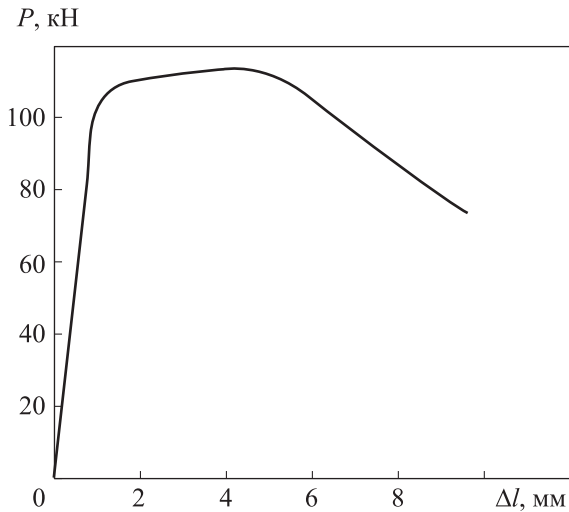


Рис. 5. Первичная диаграмма растяжения упрочненного образца

пытаниях — растяжение. На образцах после разрушения образуется шейка, по форме свойственная такому виду испытаний. Упрочнение волочением, используемое при патентовании, характеризуется другим НДС. К сожалению, до сих пор нет общепринятой теории упрочнения при патентовании.

При кручении, в отличие от волочения, упрочнение по сечению распределяется по тому же закону, что и крутящий момент.

Наибольшее упрочнение будет иметь место на поверхности. Касательные напряжения

$\tau = M_{кр}/(0,2d_3) = 1100 \text{ МПа}$ (d_3 — диаметр заготовки), в исходном состоянии $\tau = 750 \text{ МПа}$.

Применяемые для упрочнения дробеметный наклеп и обкатка роликом торсионов создают небольшую толщину упрочненного слоя с резким переходом к зоне растягивающих напряжений. При кручении эта зона смещается в середине вследствие плавности изменения напряжений от крутящего момента. Механические испытания на растяжение дают усредненные значения прочности и пластических свойств по сечению. В исходном состоянии сталь имеет следующие свойства: предел прочности $\sigma_b = 1280 \text{ МПа}$, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 930 \text{ МПа}$, относительное удлинение $\delta = 11...12 \%$. После упрочнения по выбранному режиму $\sigma_b = 1450 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 1400 \text{ МПа}$, $\delta = 8...9 \%$.

Выводы

1. Упрочнение заготовки кручением можно рассматривать как эффективный способ, не связанный с уменьшением ее толщины.

2. НДС заготовки после упрочнения соответствует оптимальному распределению напряжений в сечении для упругих элементов.

3. Рассмотренный способ упрочнения может быть применен для тех сечений проволоки, которые мало пригодны для патентования, а также для торсионов.

Литература

- [1] Wang C., Li F., Li J., Dong J., Xue F. Microstructure Evolution, hardening thermal behavior of commercially pure copper subjected to torsion deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 598, pp. 7–14, doi: 10.1016/j.msea.2013.12.079
- [2] Liu J., Li F., Chen H. Influences of pre-torsion deformation on microstructure and mechanical properties of pure titanium subjected to subsequent tension deformation. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, vol. 31, iss. 4, pp. 837–844, doi: 10.1016/j.cja.2017.10.009
- [3] Guo N., Zhang Z., Dong Q., Yu H., Song B., Chai L., Liu C., Yao Z., Daymond M.R. Strengthening and toughening austenitic steel by introducing gradient martensite via cyclic forward/reverse torsion. *Materials & Design*, 2018, vol. 143, pp. 150–159, doi: 10.1016/j.matdes.2018.01.058
- [4] Zhao T.-Z., Zhang S.-H., Zhang G.-L., Song H.-W., Cheng M. Hardening and softening mechanisms of pearlitic steel wire under torsion. *Materials & Design*, 2014, vol. 59, pp. 397–405, doi: 10.1016/j.matdes.2014.03.029
- [5] Guo N., Luan B., Liu Q. Influence of pre-torsion deformation on microstructures and properties of cold drawing pearlitic steel wires. *Materials & Design*, 2013, no. 50, pp. 285–292, doi: 10.1016/j.matdes.2013.02.047
- [6] Крюков А.А. Моделирование и экспериментальное исследование упрочнения цилиндрических изделий методом совместного упругопластического деформирования растяжением и кручением. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2011, 13(4-4), с. 970–974.

- [7] Khoddam S., Hodgson P.D., Parsa M.H. High pressure torsion process of a cylindrical segment sample. *Conference 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, At Tehran University, Society of Iranian Metallurgical engineers, Procedia Materials Science, 2015, pp. 1–6.
- [8] Крюков А.А. Технология упрочнения длинномерных цилиндрических изделий совместным растяжением и реверсивным кручением. *Металлообработка*, 2015, № 3(87), с. 11–17.
- [9] Малыгин Г.А. Механизм деформационного упрочнения и образования дислокационных структур в металлах при больших деформациях. *Физика твердого тела*, 2006, т. 48, № 4, с. 651–657.
- [10] Каратушин С.И., Храмова Д.А., Пехов В.А. Эффект Баушингера при различных видах пластической деформации. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 12, с. 45–50, doi: 10.18698/0536-1044-2017-12-45-50
- [11] Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гулятьев В.И. О построении поверхности текучести стали 45 и проверке постулата изотропии на прямолинейных траекториях при многократных знакопеременных нагружениях. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2014, № 3, с. 71–88.
- [12] Артемьева А.А., Баженов В.Г., Жегалов Д.В., Казаков Д.А. Исследование больших упругопластических деформаций оболочек вращения при сложных нагружениях растяжением и кручением. *Прикладная механика и техническая физика*, 2015, т. 56, № 6, с. 22–30, doi: 10.15372/PMTF20150603
- [13] Денисов К.И., Дитенберг И.А., Тюменцев А.Н., Корчагин М.А., Корзников А.В. Особенности упрочнения меди при комбинированном деформационном воздействии. *Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки*, 2013, № 18(4–2), с. 1597–1598.
- [14] Dwivedi S., Lal R.K., Choubey V.K., Dwivedi J.P., Singh V.P., Shah S.K. Study of Residual Stresses in I Sectioned bars of Non-Linear Work-Hardening Materials under Torsion. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, iss. 4–5, pp. 2046–2055, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.190

References

- [1] Wang C., Li F., Li J., Dong J., Xue F. Microstructure Evolution, hardening thermal behavior of commercially pure copper subjected to torsion deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 598, pp. 7–14, doi: 10.1016/j.msea.2013.12.079
- [2] Liu J., Li F., Chen H. Influences of pre-torsion deformation on microstructure and mechanical properties of pure titanium subjected to subsequent tension deformation. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, vol. 31, iss. 4, pp. 837–844, doi: 10.1016/j.cja.2017.10.009
- [3] Guo N., Zhang Z., Dong Q., Yu H., Song B., Chai L., Liu C., Yao Z., Daymond M.R. Strengthening and toughening austenitic steel by introducing gradient martensite via cyclic forward/reverse torsion. *Materials & Design*, 2018, vol. 143, pp. 150–159, doi: 10.1016/j.matdes.2018.01.058
- [4] Zhao T.-Z., Zhang S.-H., Zhang G.-L., Song H.-W., Cheng M. Hardening and softening mechanisms of pearlitic steel wire under torsion. *Materials & Design*, 2014, vol. 59, pp. 397–405, doi: 10.1016/j.matdes.2014.03.029
- [5] Guo N., Luan B., Liu Q. Influence of pre-torsion deformation on microstructures and properties of cold drawing pearlitic steel wires. *Materials & Design*, 2013, no. 50, pp. 285–292, doi: 10.1016/j.matdes.2013.02.047
- [6] Kryukov A.A. Modeling and experimental research of hardening of the cylindrical samples by method of joint elastoplastic deformation by stretching and torsion. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13(4–4), pp. 970–974 (in Russ.).
- [7] Khoddam S., Hodgson P.D., Parsa M.H. High pressure torsion process of a cylindrical segment sample. *Conference 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, At Tehran University, Society of Iranian Metallurgical engineers, Procedia Materials Science, 2015, pp. 1–6.

- [8] Kryukov A.A. Technology of hardening of long cylindrical products by joint tension and reversing torsion. *Metalloobrabotka*, 2015, no. 3(87), pp. 11–17 (in Russ.).
- [9] Malygin G.A. Mechanism of deformation hardening and formation of dislocation structures in metals at large deformations. *Physics of the Solid State*, 2006, vol. 48, no. 4, pp. 651–657 (in Russ.).
- [10] Karatushin S.I., Khramova D.A., Pekhov V.A. The Bauschinger Effect for Various Types of Plastic Deformation. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2017, no. 12, pp. 45–50 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2017-12-45-50
- [11] Zubchaninov V.G., Alekseyev A.A., Gul'tyayev V.I. About drawing of the yield surface for steel 45 and verification of the postulate of isotropy on straight-line paths during repeated sign-variable loadings. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2014, no. 3, pp. 71–88 (in Russ.), doi: 10.15593/perm.mech/2014.3.05
- [12] Artem'yeva A.A., Bazhenov V.G., Zhegalov D.V., Kazakov D.A. Investigation of large elastic-plastic deformations of the shells of rotation under complex loads by stretching and torsion. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 22–30, doi: 10.15372/PMTF20150603
- [13] Denisov K.I., Ditenberg I.A., Tyumentsev A.N., Korchagin M.A., Korznikov A.V. Features of copper hardening under combined deformation processing. *Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences*, 2013, no. 18(4–2), pp. 1597–1598.
- [14] Dwivedi S., Lal R.K., Choubey V.K., Dwivedi J.P., Singh V.P., Shah S.K. Study of Residual Stresses in I Sectioned bars of Non-Linear Work-Hardening Materials under Torsion. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, iss. 4–5, pp. 2046–2055, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.190

Статья поступила в редакцию 24.12.2018

Информация об авторах

КАРАТУШИН Станислав Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика деформируемого твердого тела». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: karatsi@bk.ru).

ХРАМОВА Дария Алексеевна — старший преподаватель кафедры «Механика деформируемого твердого тела». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: khdoria@mail.ru).

ПЛЕШАНОВА Юлия Андреевна — кандидат технических наук, инженер. ЗАО «НПО специальных материалов» (194044, Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., д. 28А, e-mail: Jylia_1980@mail.ru).

Information about the authors

KARATUSHIN Stanislav Ivanovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, e-mail: karatsi@bk.ru).

KHRAMOVA Dariya Alekseevna — Senior Lecturer, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, khdoria@mail.ru).

PLESHANOVA Yuliya Andreevna — Candidate of Science (Eng.), Engineer. ZAO Research and Production Amalgamation for Special Materials (194044, Saint-Petersburg, Russian Federation, B. Sampsonievskiy Proyezd, Bldg. 28A, e-mail: Jylia_1980@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Каратушин С.И., Храмова Д.А., Плешанова Ю.А. Моделирование процесса упрочнения заготовки кручением. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 2, с. 34–39, doi: 10.18698/0536-1044-2019-2-34-39

Please cite this article in English as:

Karatushin S.I., Khramova D.A., Pleshanova Y.A. Hardening by Torsion and Process Modelling. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 2, pp. 34–39, doi: 10.18698/0536-1044-2019-2-34-39