

ФОРМИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В СТЕРЖНЯХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2015

Д.А. Расторгуев, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

К.О. Семенов, магистрант кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: остаточные напряжения; нежесткий вал; волновая механика; фазовая траектория; реологическая модель; локальность; деформация.

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы обеспечения равномерности деформирования мало жестких валов, винтов при одновременном действии продольных нагрузок и нагрева при термосиловой обработке. Однородность остаточных деформаций в продольном направлении обеспечивает выравнивание остаточных технологических напряжений, а это ведет к минимальному короблению в осевом направлении вследствие релаксации напряжений. Особенно актуальны эти вопросы для ходовых винтов, у которых жесткие требования по точности шага. В работе приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию основных технологических режимов термосиловой обработки: величины деформации, скорости деформирования и температуры нагрева на равномерность деформирования по длине вала, выразившейся коэффициентом локальности, который определялся как отношение максимальной деформации одного из участков к средней или минимальной деформации участков. Приведено сравнение кривых упрочнения, полученных при теоретическом моделировании процесса деформирования и из результатов натурного эксперимента, из которого следует вывод о неустойчивом, колебательном характере деформирования на стадии пластического течения. Из различных теорий, связанных с возможностью возникновения волн деформаций при нагружении деталей, в упругой постановке задачи, ударных возмущений для объяснения неравномерности распределения пластических деформаций по длине образца была принята волновая теория распространения упруго-пластических деформаций при статическом нагружении. На основе реологической модели Фойхта были получены фазовые траектории для различных параметров системы, которые показали возможность реализации в системе затухающих волновых процессов. С учетом этого предлагается управлять процессом формирования распределения остаточных деформаций с учетом формирующихся зон узлов и пучностей упруго-пластических деформаций.

ВВЕДЕНИЕ

Для длинномерных мало жестких деталей типа валов основная трудность при их изготовлении заключается в снижении поперечного коробления в межоперационный и в эксплуатационный периоды. Для винтов и ходовых валов, которые относятся к группе валов, помимо поперечной деформации, нерешенной проблемой является обеспечение равномерных физико-механических свойств и геометрии вдоль оси детали. Это связано с жесткими требованиями по шагу резьбы. При релаксации остаточных технологических напряжений происходит деформация вала в продольном направлении, что с неизбежностью приводит к потере точности шага резьбы и снижению кинематической точности изделия в целом. Поэтому при изготовлении деталей данной группы нужно стремиться к обеспечению не только поперечной, но и продольной устойчивости.

Релаксационные процессы в материале заготовки ведут к потере точности резьбы по шагу за счет самопроизвольных деформационных процессов в осевом направлении. Степень коробления зависит от характера и интенсивности распределения остаточных напряжений, особенностей геометрии детали и физико-механических свойств ее материала. Чтобы снизить коробление, необходимо либо повысить сопротивление металла пластическому деформированию, т. е. его релаксационную стойкость, либо уменьшить действующие напряжения. В последнее время получают развитие методы старения, повышающие релаксационную стойкость материала с небольшим снижением уровня остаточных напряжений.

К ним относятся статическое и динамическое нагружение, старение тепловыми ударами, вибрационное старение, обработка ультразвуком, стабилизация размеров деталей в магнитном поле, обработка электрогидравлическим ударом, облучение рентгеновскими лучами. Существуют способы снижения уровня остаточных напряжений в мало жестких деталях в зависимости от физико-механических свойств их материала: пластическая деформация, отжиг, отпуск и т. д.

К недостаткам традиционной термообработки можно отнести следующее: остаточные напряжения снимаются не полностью в зависимости от температуры обработки, длительности выдержки, материала, массивности изделия; при нагреве и последующем охлаждении заготовка с остаточными напряжениями меняет свою форму и размеры; термообработка длинномерных деталей является трудоемкой операцией, снижающей производительность процесса. Существенное влияние при этом оказывает скорость охлаждения после термической операции, так как при остывании изделий возможно наведение новых остаточных напряжений и коробление длинномерных заготовок.

Процесс деформации в протяженных заготовках является неравномерным. Волновой характер процесса деформирования рассматривается или в задачах для упругой деформации [1; 2], или для упруго-пластической деформации с учетом внешних колебаний. Причем в последнем случае рассматриваются в основном вопросы рассеяния энергии в материале [3; 4]. Также рассматривается волновой процесс деформирования при

ударных воздействиях [5–7]. Также отмечен феноменологический подход для описания волнового процесса упруго-пластического деформирования, в том числе в виде модели Фойхта для распределенных систем [8–11]. При этом модель Фойхта ограниченно подходит только для определенных материалов и случаев деформирования.

Для обеспечения точности обработки маложестких валов за счет равномерности их деформирования в продольном направлении, сохранения размерной стабильности необходимо формировать напряженно-деформированное состояние заготовки с учетом локализации деформации автоволнового характера. Для этого разработана технология термосилового обработки (ТСО), заключающаяся в одновременном приложении осевой нагрузки и высокой температуры [9–19]. Целью является минимизация и стабилизация остаточных напряжений в продольном и поперечном направлениях длинной детали с одновременным формированием геометрии заготовки. Усилия (напряжения) прилагаются на уровне, превышающем предел относительной пропорциональности $\sigma_{0,2}$, т. е. в зоне пластических деформаций. Для сведения к минимуму коробления (автодеформаций валов) целесообразно обеспечить при термообработке под нагрузкой достаточное развитие пластической деформации. Соответственно, необходимо ис-

следовать распределение упруго-пластических деформаций, характер их локализации и распределение остаточных напряжений в стержнях на основных формообразующих операциях.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Резко выраженная локализация деформации по длине вала наблюдается при больших степенях формоизменения при растяжении в виде шейки. При описании локализации деформации она рассматривается как неравномерность формоизменения, а не закономерный физический процесс. В процессе развития локальной деформации возникают значительные колебания истинных напряжений, которые обусловлены сменой упрочнений и разупрочнений. Данный процесс характеризуется амплитудой и частотами. Локализация деформации происходит после достижения порога предела текучести и проявляется как возникновение и приостановка областей локального течения до появления устойчивой шейки.

Результат моделирования упруго-вязко-пластической деформации на основе реологической модели показан на рис. 1 [19]. Но реальная кривая упрочнения имеет не гладкий характер, а явно выраженные релаксационные возмущения, которые указывают на неравномерный характер деформирования (рис. 2).

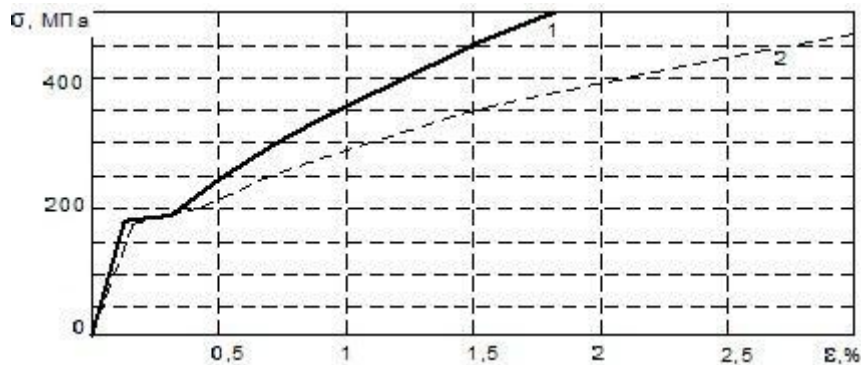


Рис. 1. Кривые упрочнения при 20 °С (сталь 35):
1 – с учетом упрочнения; 2 – без учета упрочнения

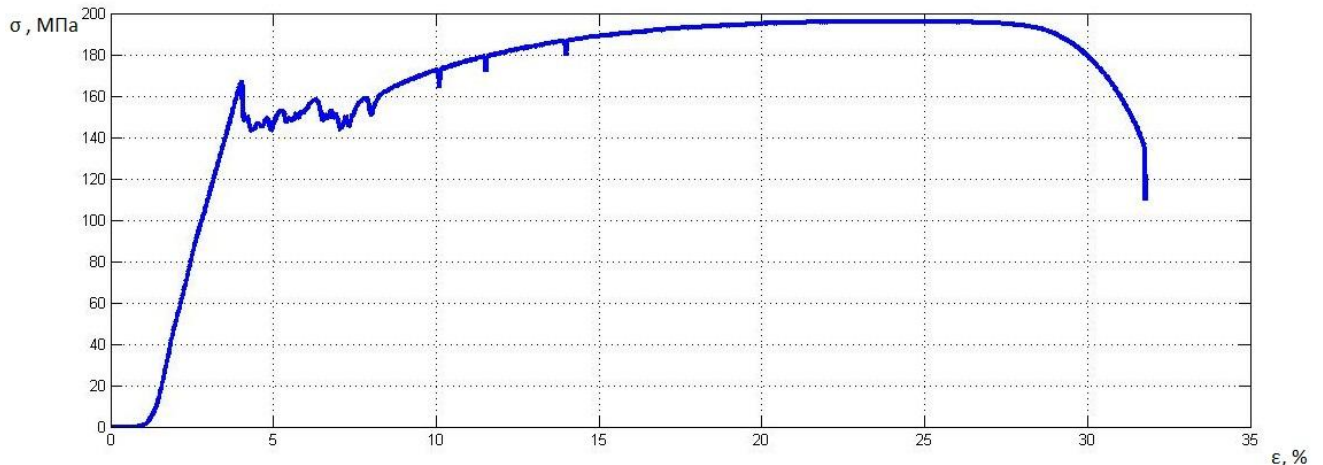


Рис. 2. Экспериментальная кривая упрочнения стали 35

Ниже приведены результаты моделирования волнового процесса на основе элементарной реологической модели Фойхта в виде системы уравнений [8]:

$$\begin{cases} \sigma' = -\frac{\sigma - \sigma_0}{T} - g \cdot \varepsilon \cdot \sigma, \\ \varepsilon' = -\frac{\varepsilon}{\tau} + \frac{\sigma}{\eta}; \end{cases} \quad (1)$$

где τ – время релаксации деформационных процессов, с;
 η – динамическая вязкость, МПа·с;
 σ – напряжения, МПа;
 σ_0 – уровень напряжений, до которого они релаксируют на концентраторе, МПа;
 T – время релаксации напряжений, с;
 g – константа;
 ε – деформация.

Граничные условия для данной системы:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \sigma}{\partial r} \Big|_{r=l_0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=l_0} = 0,$$

где r – линейный размер образца, м;
 l_0 – длина образца, м.

Решение системы:

$$\sigma = \sigma_m e^{pt}; \quad \varepsilon = \varepsilon_m e^{pt},$$

где комплексная частота p деформационного процесса

$$p^2 + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + \frac{g\sigma_0 T}{\eta} \right) p + \left(\frac{1}{\tau T} + \frac{2g\sigma_0}{\eta} \right) = 0.$$

Для определения возможности возникновения автоволновых процессов для системы (1) построим фазовые портреты (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспериментальных исследований [20], где изучались вопросы локализации деформации с использованием большого объема экспериментальных данных при варьировании технологических факторов (величины деформации, скорости деформирования и температуры нагрева) (пример такой гистограммы на рис. 4), показывают, что неравномерность деформирования по длине может являться не только следствием неравномерности исходных свойств материала, но волновым характером процесса пластической деформации.

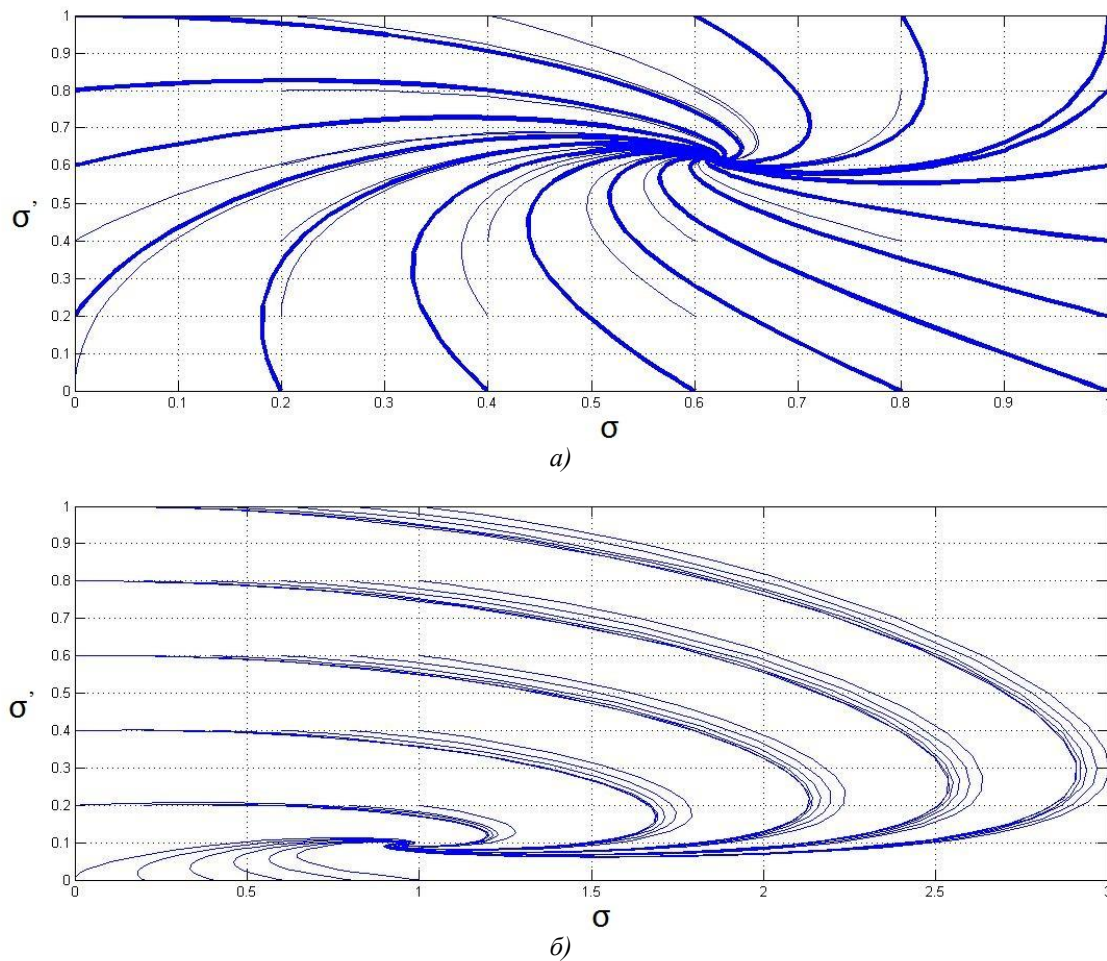


Рис. 3. Фазовые портреты системы (1) с различными параметрами модели:
 а – быстрое затухание в системе; б – медленное затухание в системе

При переходе за предел текучести одновременного охвата пластической деформацией всего объема металла не происходит до тех пор, пока все микрообъемы металла не окажутся охваченными пластической деформацией критической величины. Только после этого возможна одновременная деформация всего объема материала.

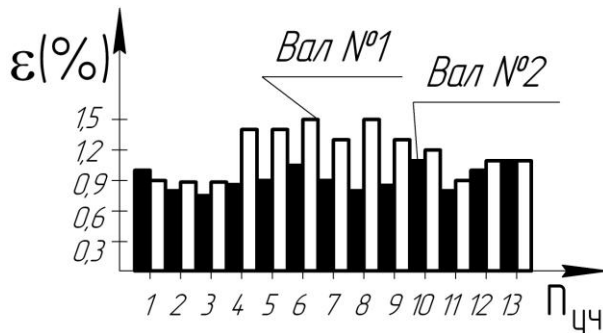


Рис. 4. Распределение деформаций по участкам для экспериментальных образцов

Трудность определения данной пороговой величины деформации заключается в том, что эта величина зависит от таких параметров, как размер зерна, вид термической обработки, величина скорости деформирования и т. д. В качестве оценки, характеризующей среднюю неравномерность пластических деформаций, взят критерий локальности $K_{cp} = \varepsilon_{max} / \varepsilon_{cp}$.

Значение K_{cp} , близкое к единице, свидетельствует об однородности пластических деформаций материала по всей длине заготовки. Из результатов исследований видно, что значение K_{cp} с увеличением средней деформации постепенно уменьшается. При минимальной деформации $\varepsilon \leq 1\%$ наблюдается значительный разброс данных и большое значение коэффициента K_{cp} (от 1,5 до 2) на рабочих температурных режимах.

Пластическая деформация в поликристаллических металлах в условиях однородного напряженного состояния характеризуется локальностью протекания. Здесь следует различать микро- и макролокальность (неоднородность) пластической деформации. Неравномерность пластической деформации в микрообъемах оказывает значительное влияние на процесс пластического течения в целом и на критерии прочности, однако количественного влияния микронеоднородности на макронеоднородность пластической деформации пока еще сделать не удастся. Неравномерность пластической деформации имеет две фазы протекания. Первая – одновременная, но неравномерная деформация микрообъема металла имеет решающее значение для оценки неоднородности пластических свойств материалов. Поэтому критерий K_{cp} оказывается чувствителен к изменению структуры металла. Если в результате некачественной термической обработки оказались участки с различными по величине зернами, то величина K_{cp} резко возрастает.

При ТСО при растяжении вдоль оси вала происходят периодические изменения структуры материала, связанные с колебательным характером изменения раз-

меров дефектных элементов. В ходе экспериментов над образцами из малоуглеродистой стали [12] выявлена логарифмическая зависимость величины длины пластической волны λ от размеров зерна, линейная – от размера поперечника образца. Скорость же распространения волны пластической деформации v возрастает с увеличением скорости нагружения и не зависит от размеров зерен и размеров вала.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что неравномерность пластической деформации длинномерных валов при ТСО является результатом действия не только исходной неоднородности физико-механических свойств материала заготовки, его структуры, но и результатом действия собственно волнового процесса пластической деформации.

Для повышения качества ТСО необходимо учитывать влияние частотных параметров данной волны на распределение узлов и пучностей зон пластической деформации по длине заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.И. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 350 с.
2. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
3. Писаренко Г.С. Обобщенная нелинейная модель учета рассеяния энергии при колебаниях. Киев: Наукова думка, 1985. 236 с.
4. Писаренко Г.С., Богинич О.Е. Колебания кинематически возбуждаемых систем с учетом диссипации энергии. Киев: Наукова думка, 1982. 220 с.
5. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
6. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
7. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. 194 с.
8. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
9. Зуев Л.Б. О волновом характере пластического течения. Макроскопические волны локализации деформации // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 3. С. 47–54.
10. Зуев Л.Б., Данилов Л.Б. Медленные волновые процессы при деформации твердых тел // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 1. С. 75–94.
11. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 5–22.
12. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А. Новая технология термосилового обработки малолегированных валов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 32–35.
13. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А. Экспериментальная установка для равномерного осевого пластического деформирования малолегированных деталей при термосилового обработке // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 9. С. 15–18.

14. Драчев О.И. Технология изготовления мало жестких осесимметричных деталей. СПб.: Политехника, 2005. 289 с.
15. Драчев О.И., Ареткин А.В., Драчев А.О., Яшкина Т.Л. Способ и устройство для термосиловой обработки осесимметричных длинномерных деталей : патент РФ № 2235794; заявл. 20.02.2001; опубл. 10.09.2004.
16. Драчев О.И. Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости. Ирбит: ОНИКС, 2011. 192 с.
17. Драчев О.И. Повышение точности и стабильности форм не жестких осесимметричных деталей методом термосиловой обработки. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 267 с.
18. Репин К.А., Драчев О.И., Воронов Д.Ю. Новые технологии обработки мало жестких длинномерных деталей и описание устройства для их реализации // Механика XXI века: XII Всерос. науч.-техн. конф. Братск: Братский гос. ун-т, 2013. С. 135–139.
19. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 80–85.
20. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Повышение эффективности обработки мало жестких валов при комбинированном термосиловом нагружении // Металлообработка. 2012. № 3. С. 30–35.
8. Panin V.E., Likhachev V.A., Grinyaev Yu.V. *Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural levels of solid bodies deformation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, 229 p.
9. Zuev L.B. On the wave character of plastic flow. Macroscopic autowaves of deformation localization. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2006, vol. 9, no. 3, pp. 47–54.
10. Zuev L.B., Danilov V.I. Slow autowave processes in the course of deformation of solid. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2003, vol. 6, no. 1, pp. 75–94.
11. Panin V.E. Foundations of physical mesomechanics. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 5–22.
12. Drachev O.I., Voronov D.Yu., Rastorguev D.A. New technology of thermo-power processing of elastic shafts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 1, pp. 32–35.
13. Drachev O.I., Voronov D.Yu., Rastorguev D.A. Experimental plant for uniform axle plastic deformation of non-hard parts during thermo-power processing. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 9, pp. 15–18.
14. Drachev O.I. *Tekhnologiya izgotovleniya malozhestkikh osesimmetrichnykh detaley* [Technology of production of non-hard axisymmetric parts]. S. Petersburg, Politekhnik Publ., 2005, 289 p.
15. Drachev O.I., Argetkin A.V., Drachev A.O., Yashkina T.L. *Sposob i ustroystvo dlya termosilovoy obrabotki osesimmetrichnykh dlinnomernykh detaley* [Method and device for thermo-power processing of axisymmetric long parts]. Patent RF no. 2235794, 2004.
16. Drachev O.I. *Upravlenie tekhnologicheskoy nasledstvennostyu detaley maloy zhestkosti* [Control of technological heredity of fragility parts]. Irbit, ONIKS Publ., 2011, 192 p.
17. Drachev O.I. *Povyshenie tochnosti i stabilnosti form nezhestkikh osesimmetrichnykh detaley metodom termosilovoy obrabotki* [The improvement of accuracy and stability of forms of non-hard axisymmetric parts using the method of thermo-power processing]. Stary Oskol, TNT Publ., 2011, 267 p.
18. Repin K.A., Drachev O.I., Voronov D.Yu. New technologies of processing of fragile long parts and description of the device for their implementation. *Materialy XII Vseros. nauchno-tekhn. konf. "Mekhaniki XXI veku"*. Bratsk, Bratskiy gos. universitet Publ., 2013, pp. 135–139.
19. Drachev O.I., Rastorguev D.A., Starostina M.V. Modeling of the elastic-plastic deformations at thermal force processing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 3, pp. 80–85.
20. Drachev O.I., Rastorguev D.A., Starostina M.V. Increase of efficiency of processing of low-rigid shaft at the combined thermopower loading. *Metalloobrabotka*, 2012, no. 3, pp. 30–35.

REFERENCES

1. Rabotnov Yu.I. *Elementy nasledstvennoy mekhaniki tverdykh tel* [The elements of hereditary mechanics of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 350 p.
2. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Solid mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 744 p.
3. Pisarenko G.S. *Obobshchennaya nelineynaya model' ucheta rasseyaniya energii pri kolebaniyakh* [General nonlinear model of energy dissipation evaluation during oscillations]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985, 236 p.
4. Pisarenko G.S., Boginich O.E. *Kolebaniya kinematicheski vzbuzhdaemykh system s uchetom dissipatsii energii* [Fluctuations of kinematically induced systems with the account of energy dissipation]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 220 p.
5. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov. Ch. 1. Deformatsiya i razrushenie* [Mechanical properties of metals. P. 1. Deformation and destruction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 472 p.
6. Kachanov L.M. *Osnovy teorii plastichnosti* [Foundations of the theory of plasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 420 p.
7. Kolsky G. *Volny napryazheniya v tverdykh telakh* [Stress waves in solid bodies]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1955, 194 p.

**THE FORMATION OF DISTRIBUTION OF ELASTO-PLASTIC DEFORMATION IN THE RODS
IN THE RESULT OF WAVE PROCESSES**

© 2015

D.A. Rastorguev, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Equipment and technology of engineering manufacture”
K.O. Semenov, graduate student of Chair “Equipment and technology of engineering manufacture”
Togliatti state University, Togliatti (Russia)

Keywords: residual stresses; elastic shaft; wave mechanics; phase trajectory; rheological model; locality; deformation.

Abstract: The paper considers the issues of ensuring the uniformity of deformation of elastic shafts and screws under the simultaneous action of the longitudinal loads and heating during thermal-power processing. The uniformity of residual deformations in the longitudinal direction ensures the equalization of the residual technological stresses, and it leads to the minimum buckling in the axial direction due to the stress relaxation. These questions are particularly topical for the lead screws which have strict requirements for the spacing accuracy. The paper presents the results of experimental studies on the influence of main technological modes of thermo-power processing: the degree of deformation, deformation rate and heating temperature on the uniformity of deformation along the length of the shaft, which is expressed by the coefficient of locality, which is defined as the ratio of maximum deformation of one of the sections to the average or minimum deformation of areas. The authors give the comparison of the hardening curves obtained during theoretical modeling of the deformation process and from the results of the full-scale experiment which followed by a conclusion on the unstable, oscillating deformation nature at the stage of plastic flow. Among various theories concerned with the possibility of deformation wave occurrence during parts load, in the elastic task formulation of impact disturbances, the wave theory of elasto-plastic deformations distribution under the static loading was used for explanation of non-uniformity of plastic deformations distribution along the length of the sample. On the basis of Voigt rheological model, phase trajectories for different parameters of the system were obtained, that showed the feasibility of implementation within the system of damped wave processes. Taking it into account, the authors suggested controlling of the process of formation of residual stresses distribution in view of the forming node areas and antinodes of the elasto-plastic deformations.