

Более целесообразно определить значение единого радиуса пуансона для всего диапазона. Значение радиуса составляет 593 мм, принимаем 595. Оценка деформации кромки для этого случая показала, что этот показатель находится в упругой области ($\epsilon_{кр} = 0,0023$ при $\epsilon_T = 0,00275$). Кроме этого проведена оценка отклонения положения точки в пространстве для эвольвентного и однорадиусного профиля кромки для наиболее нагруженного типоразмера трубы 1220×10 мм. В результате получено, что отклонение не превышает 7 %.

Выводы. Предложена методика определения диапазона унификационных групп сварных труб для подгибки кромок на участке КПП линии ТЭСА 1420. В процессе реализации методики определены:

- особенности процесса формоизменения деформационных характеристик унификационных групп для крайних типоразмеров;
- радиусы для каждой группы унификации и значение усредненного (унификационного) радиуса пуансона для всей группы диапазона труб;
- особенности формоизменения периферийных участков кромки при подгибке по разным профи-

лям нагрузки, значения отклонений кромок для двух диаметров труб и величины продольной деформации кромки.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о качественной подгибке кромок трубной заготовки, сформованной на унификационном однорадиусном пуансоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рымов В.А., Полухин П.И., Потапов И.Н. Совершенствование производства сварных труб. – М: Металлургия, 1983. – 286 с.
2. Машины и агрегаты трубного производства: Учеб. пособие / А.П. Коликов, В.П. Романенко, С.В. Самусев и др. – М.: МИСиС, 1998. – 536 с.
3. Самусев С.В., Величко А.А., Люшкин А.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 5. С. 36 – 40.
4. Самусев С.В., Фортунатов А.Н. Методы расчета напряженно-деформированного состояния при производстве сварных труб в линии ТЭСА: Сб. задач. – М.: МИСиС, 2008. – 136 с.

© 2013 г. С.В. Самусев, А.В. Люшкин, А.И. Романцов, К.Л. Жигунов, А.Н. Фортунатов
Поступила 15 января 2013 г.

УДК 621.778

Г.Н. Гурьянов¹, О.С. Железков²

¹ ООО «Феникс +»

² Магнитогорский государственный технический университет

НЕОДНОРОДНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ВОЛОКОН В РАБОЧЕМ КОНУСЕ ВОЛОКИ

Аннотация. Выполнен расчет абсолютного и относительного прироста длины материальных волокон, их истинной деформации в центральном и периферийных слоях проволочной заготовки в зависимости от коэффициента вытяжки круглой сплошной заготовки. При движении в очаге пластической деформации волокна могут только удлиняться или укорачиваться, либо сначала укорачиваться, а затем удлиняться. Расчеты показали, что при определенных значениях деформации проволоки может наблюдаться наибольшая неоднородность деформации волокон в поперечном сечении и во всем объеме пластической деформации.

Ключевые слова: волочение, проволока, однородность деформации, удлинение материального волокна, сдвиг, остаточные напряжения, качество.

DIE ENTRANCE BELL MATERIAL FIBERS DEFORMATION INHOMOGENEITY

Abstract. The calculation of the absolute and relative increase in length of the fiber material, their true strain in the central and peripheral layers of the wire piece, depending on the draw ratio solid round billets. When driving in the hearth of plastic deformation fibers can only be shortened or lengthened or shortened at first, and then lengthen. Calculations have shown that for certain values of the degree of deformation of the wire may be a maximum of inhomogeneous deformation of fibers in cross-section and in the amount of plastic deformation.

Keywords: drawing, wire, uniform deformation, elongation of the material fibers, shift, residual stresses, and the quality.

Неоднородность деформации элементарных объемов в очаге пластического формоизменения заготовки оказывает отрицательное влияние на ее деформируемость и качество металлоизделия. Авторы работы [1] показали неоднородность деформации материальных волокон с разным направлением относительно внешней нагрузки при одноосном растяжении и простом сдвиге.

Определим характер деформации материальных волокон, расположенных под различным углом к оси волочения круглой сплошной заготовки в центральных и периферийных областях рабочего канала волокна.

Перед входом очага пластической деформации, в диаметральной плоскости выделили элементарную площадь в виде квадрата *ADBC*, имеющего единичную

длину сторон (рис. 1). Каждую сторону квадрата разделили на четыре равные отрезка. Отрезки ограничены вершинами квадрата и цифрами от 1 до 12. Из точек *A* и *C* провели прямые, соединяющие границы отрезков. Эти прямые определяют исходные направления и значения длин материальных волокон заготовки волочения. Например, волокна *A1* и *C3* имеют одинаковую длину $\sqrt{1+(1/4)^2}$ и соответственно наклонены к оси волочения под углом β_0 , равным 166 и 14° . С вертикальной осью эти волокна составляют угол $\pm 76^\circ$. Следует обратить внимание, что не дается размерность длины волокна, так как размеры волокон приведены к единичной длине элементарного квадрата *ADBC*. По этой же причине не указана размерность длины волокон на рис. 1 – 5.

В рабочем конусе волокна элементарный квадрат испытал растяжение и сжатие, а также сдвиг в диаметральной плоскости. В результате деформации квадрат превратился в элементарный параллелограмм. Вертикальные стороны *AC* и *DB* не изменили своего направления, но уменьшили длину. На выходе рабочего конуса их длина равна

$$ac = db = \frac{1}{\sqrt{\mu}},$$

где $\mu = r_0^2/r_k^2$ – коэффициент вытяжки; r_0, r_k – значения радиуса заготовки до и после деформации. Горизонтальные стороны квадрата на выходе конуса имеют длину

$$ad = cb = \mu/\cos\alpha,$$

где α – угол наклона сторон *ad* и *cb* к оси волочения, зависящий от удаления элементарного квадрата от оси *oz*. При удалении квадрата от оси *z* на расстояние r_0 углы рабочего конуса α_0 и сдвига α равны. Если квадрат лежит на оси волочения, то $\alpha = 0$, и в рабочем конусе он принимает форму прямоугольника. Принятое расположение сторон четырехугольника *adbc* обеспечивает вы-

полнение гипотезы плоских поперечных сечений, широко используемой при инженерных методах расчета напряженно-деформированного состояния в процессе волочения круглого сплошного профиля [1 – 4].

Рассмотрим волокна *A6* и *C10*, составляющие с осью *z* углы 104 и 76° , а с вертикальной осью $\pm 14^\circ$. Для этих волокон даны формулы для расчета исходной длины, абсолютной и относительной длины после обжатия с коэффициентом вытяжки μ и логарифмической продольной деформации:

$$A6 = C10 = \sqrt{1+(1/4)^2};$$

$$a6 = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\mu}}\right)^2 + \left(\frac{\mu}{4\cos\alpha}\right)^2} + \sqrt{\mu} \frac{\text{tg}\alpha}{2};$$

$$c10 = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\mu}}\right)^2 + \left(\frac{\mu}{4\cos\alpha}\right)^2} - \sqrt{\mu} \frac{\text{tg}\alpha}{2};$$

$$oa6 = \frac{a6}{A6}; \quad oc10 = \frac{c10}{C10}; \quad \varepsilon(a6) = \ln(oa6); \quad \varepsilon(c10) = \ln(oc10).$$

На рис. 2 приведены зависимости длины и относительного ее изменения для волокон *A6* и *C10*, а также для волокон: *A4* ($\beta_0 = 127^\circ$) и *C12* (53°); *A5* (117°) и *C11* (63°). При расчетах были приняты три значения угла α сдвига волокон: $0, 4$ и 8° . Для волокон *A1* (166°), *A2* (153°), *A3* (143°), *C1* (37°), *C2* (27°), *C3* (14°), *AB* (135°) и *CD* (45°) на рис. 3 построены зависимости длины от коэффициента вытяжки только при $\alpha = 8^\circ$.

Волокна, проходящие через точку *A* и составляющие с осью волочения угол β_0 из интервала от 90 до 180° , в рабочем конусе волокна имеют большее значение своей длины, чем волокна с одинаковой проекцией на вертикальную ось *r* и ограниченные вершиной *C* элементарного квадрата:

$$a2 > c2; \quad a3 > c1; \quad a4 > c12;$$

$$a5 > c11; \quad a6 > c10; \quad ab > cd.$$

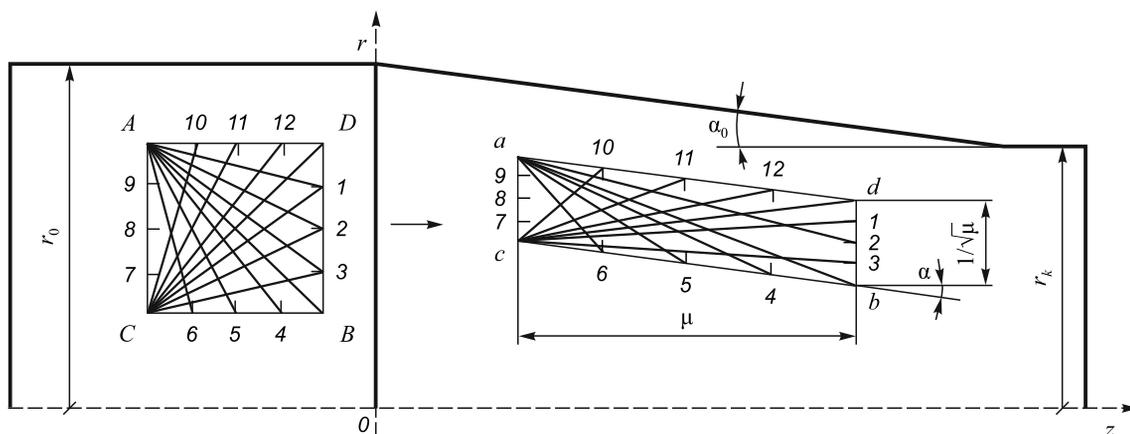


Рис. 1. Схемы к определению величины деформации материальных волокон проволочной заготовки, ограниченных сторонами элементарного квадрата

Только при малых обжатиях ($\mu < 1,4$) имеет место неравенство $a1 < c3$. Это обусловлено малым углом наклона волокон $A1$ и $C3$ к линии волочения и действием деформации сдвига при $\alpha \neq 0$. Кривые рис. 4 позволяют уточнить разницу значений длины для двух волокон с одинаковой проекцией на вертикальную ось r .

Данные рис. 2, *a* и 3, *a* при $\mu = 1$ дают возможность оценить влияние на длину волокна только деформации сдвига. Расстояние между точечными ($\alpha = 0^\circ$), пунктирными ($\alpha = 4^\circ$) и сплошными ($\alpha = 8^\circ$) линиями увеличивается с ростом коэффициента вытяжки до определенной величины (рис. 2, *a*). При этом наблюдается укорочение волокон. Это характерно для волокон, составляющих незначительный угол с осью r (например, волокна $A5$ и $C11$, $A6$ и $C10$). При дальнейшем росте об-

жатия заготовки волокна начинают удлиняться. Основная же часть волокон при разных значениях угла α непрерывно увеличивает свою длину с ростом коэффициента вытяжки. При повышенных обжатиях (рис. 3, *б*) волокна $c1$, $c2$, $c3$, cd и cb , проходящие через точку C , менее отличаются друг от друга по величине длины, чем волокна $a1$, $a2$, $a3$ и ab с более высоким значением угла β_0 . Линии рис. 3, *б* почти строго прямолинейные и параллельные.

Разница значений длины для двух волокон с одинаковой проекцией на вертикальную ось r в зависимости от их ориентации на первых стадиях деформации может даже возрасти с ростом обжатия (рис. 4). Для волокон с малым углом наклона к оси волочения при $\mu < 1,5$ разность ($a1 - c3$) несколько меньше нуля. С увеличением

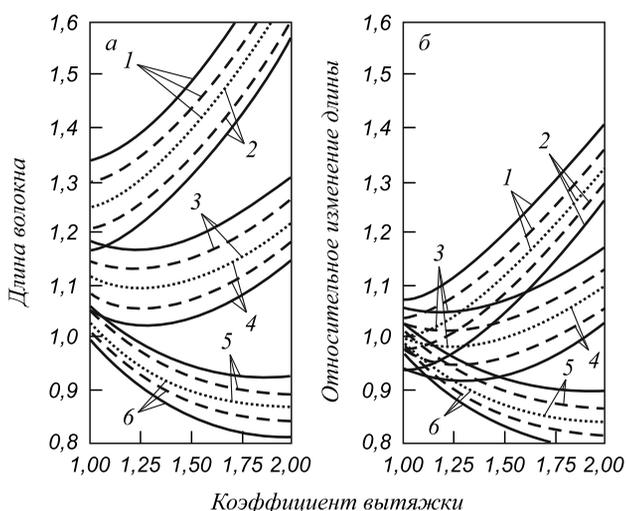


Рис. 2. Зависимость длины волокна (*a*) и относительного ее изменения (*б*) в зависимости от коэффициента вытяжки:
 1 - $\beta_0 = 127^\circ$; 2 - $\beta_0 = 53^\circ$; 3 - $\beta_0 = 117^\circ$; 4 - $\beta_0 = 63^\circ$;
 5 - $\beta_0 = 104^\circ$; 6 - $\beta_0 = 76^\circ$; сплошные линии - $\alpha = 8^\circ$;
 пунктирные - $\alpha = 4^\circ$; точечные - $\alpha = 0^\circ$

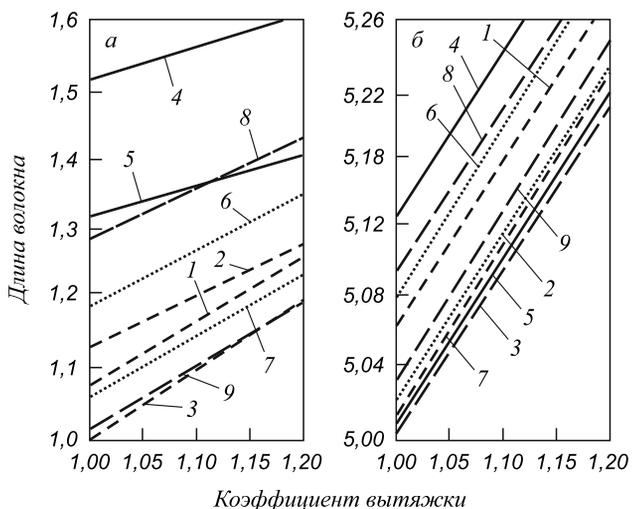


Рис. 3. Зависимость длины волокна от коэффициента вытяжки при малых (*a*) и повышенных (*б*) его значениях при $\alpha = 8^\circ$:
 1 - $a1$; 2 - $c3$; 3 - cb ; 4 - ab ; 5 - cd ; 6 - $a2$; 7 - $c2$; 8 - $a3$; 9 - $c1$

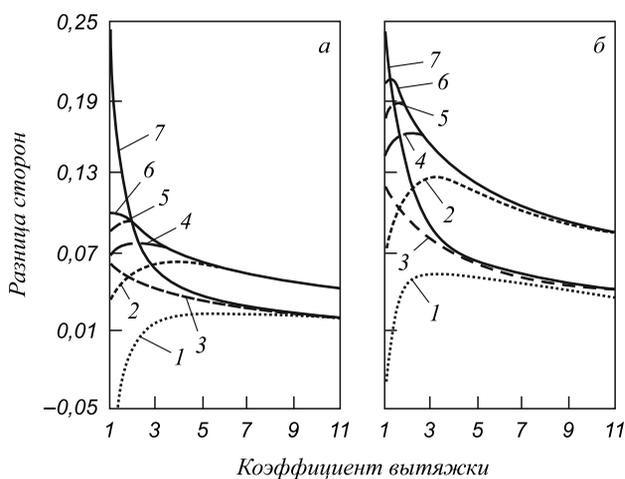


Рис. 4. Различие продольного размера двух волокон:
a - $\alpha = 4^\circ$; *б* - $\alpha = 8^\circ$;
 1 - ($a1 - c3$); 2 - ($a6 - c10$); 3 - ($a2 - c2$); 4 - ($a4 - c12$); 5 - ($a5 - c11$); 6 - ($ab - cd$); 7 - ($a3 - c1$)

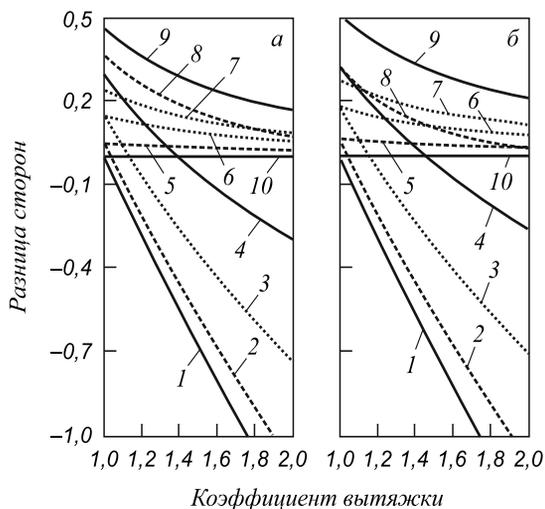


Рис. 5. Различие продольного размера двух волокон:
a - $\alpha = 4^\circ$; *б* - $\alpha = 8^\circ$;
 1 - ($ac - ad$); 2 - ($ab - ad$); 3 - ($a5 - ad$); 4 - ($a4 - ad$); 5 - ($a1 - ad$);
 6 - ($a2 - ad$); 7 - ($a3 - ad$); 8 - ($cd - ad$); 9 - ($ab - ad$);
 10 - линия для нулевого уровня разницы

угла α (рис. 4, б) усиливается различие продольных размеров сравниваемых волокон.

В зависимости от коэффициента вытяжки вычислены значения длины волокон, проходящих через вершину A элементарного квадрата, волокна – диагонали CD и волокна AD , параллельного оси волочения до начала деформации (см. рис. 1). Начальную и текущую длину волокна AD выбрали базовой. Исходная длина базового волокна AD меньше других за исключением длины волокна AC ($AD = AC$). Данные рис. 5 показывают различие значений длины для базового волокна AD и для других отмеченных волокон. С ростом обжатия волокна ac , ab , $a5$, $a4$ при определенных степенях деформации становятся короче базового волокна ad . При этом различие длины волокон $a1$, $a2$, $a3$, cd , ab и ad стало меньше. С увеличением угла α от 4 до 8° в целом возросла абсолютная разница размеров сравниваемых пар волокон. Волокно AD параллельно, а AC перпендикулярно оси волочения (см. рис. 1). Поэтому интенсивно возрастает разность значений для длины волокон ad и ac с ростом вытяжки

$$\Delta l_1 = ad - ac = \frac{\mu}{\cos \alpha} - \frac{1}{\sqrt{\mu}}.$$

Различие размеров для волокон ad и ac в поверхностном слое максимально ($\alpha = \alpha_0$). В центральном слое ($\alpha = 0$) эта разница меньше

$$\Delta l_0 = ad - ac = \mu - \frac{1}{\sqrt{\mu}}.$$

Сдвиговая деформация отсутствует в центральном слое, и логарифмическая деформация волокна ad равна $\varepsilon_0 = \ln(\mu)$. В поперечном сечении с тем же коэффициентом вытяжки логарифмическая деформация волокна в периферийном слое определяется как

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l_\mu}{l_{\mu=1}}\right),$$

где $l_{\mu=1}$, l_μ – соответственно длина волокна, ограниченная сторонами элементарного квадрата до деформации, и длина этого волокна после деформации с коэффициентом вытяжки μ . Разница значений $l_{\mu=1}$ и l_μ в общем случае вызвана деформацией при растяжении–сжатии и сдвиговой деформацией. Отношение ε и ε_0 характеризует степень различия величины деформации конкретного волокна и деформации волокна ad в центральном слое при коэффициенте вытяжки μ

$$C_{cd} = \frac{\ln\left(\frac{l_\mu}{l_{\mu=1}}\right)}{\ln \mu}. \quad (1)$$

Пусть элементарное поперечное сечение или элементарный объем, ограниченный этим сечением, состоит из n равных составляющих. Если в начале очага деформации в каждой i -ой составляющей элементарного поперечного сечения или элементарного поперечного объема удалось определить усредненную величину угла β_0 находящихся в них волокон (задача нанотехнологии в обработке металлов давлением), то можно вычислить значения показателя C_{cdi} (1). По значениям C_{cdi} определяется средняя величина \bar{C}_{cd} при заданном коэффициенте вытяжки, которая может быть использована для оценки неоднородности деформации в поперечном сечении или объеме деформации при коэффициенте вытяжки μ , например, по формулам из математической статистики

$$D^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (C_{cdi} - \bar{C}_{cd})^2}{n-1}; \quad (2)$$

$$D = \sqrt{D^2}; \quad (3)$$

$$v = \frac{D}{\bar{C}_{cd}}, \quad (4)$$

где n – количество малых площадей или объемов соответственно в элементарном сечении или объеме; C_{cdi} – показатель для i -ой малой площади или i -го малого объема. Зависимости (2) – (4) определяют соответственно дисперсию D^2 , среднее квадратическое отклонение D и коэффициент вариации v для показателя неоднородности деформации C_{cd} .

Дальнейшие вычисления показали, что с ростом обжатия снижается количество укорачивающихся волокон, и при определенной степени деформации (условно назовем ее критической) их большинство (например, более 95 %) удлиняется с одновременным уменьшением своего угла наклона к оси волочения. Чем меньше перед входом рабочего конуса волокна волокон с малым углом к вертикальной оси r , тем будет более однородной деформация в поперечном сечении и во всем объеме пластического формоизменения заготовки. При этом снижается величина критической деформации. Для повышения однородности деформации в микрообъеме необходимо, чтобы соприкасающиеся или близкие друг к другу волокна имели незначительное различие значений угла наклона β_0 . Это будет способствовать формированию низкого уровня остаточных напряжений и одинаковой прочности волокон. Таким образом, в зависимости от природы материала и способов термической или термомеханической обработки заготовки существует диапазон значений степени ее обжатия, при которых наблюдается наибольшая неоднородность деформации. На рис. 4 максимум различия размеров волокон находится в интервале коэффициента вытяжки $1,8 - 3,0$ (технологическая степень деформации $Q = 44 - 67 \%$).

Максимум неоднородности деформации должен вызывать определенное влияние на показатели качества проволоки и проволочных изделий.

Такое заключение согласуется с результатами ряда экспериментальных исследований. Например, в работе [5] отмечено, что при суммарных степенях технологической деформации углеродистой проволоки $Q = 40 - 50\%$ в ней возникают остаточные напряжения порядка 75% предела текучести. У такой проволоки несколько меньший уровень усталостной и коррозионной стойкости, чем у проволоки с деформацией $Q = 75 - 90\%$. Образцы проволоки из стали 12Х18Н10Т [6], протянутой со степенью деформации $Q = 66\%$, разрушились при действии растягивающей нагрузки в сероводородсодержащей среде в течение $50 - 144$ ч, а после проведения отпуска этой проволоки при $400\text{ }^\circ\text{C}$ время до разрушения увеличилось в два раза. Стойкость холоднотянутых образцов с меньшей и большей степенью деформации находилась в интервале $200 - 300$ ч. Увеличение стойкости к сероводородному растрескиванию проволоки после проведения отпуска вызвано снижением внутренних напряжений [6].

Выводы. Определена схема деформации материальных волокон в центральном и периферийных слоях проволочной заготовки. В зависимости от степени деформации заготовки, места расположения материальных волокон и их ориентации на выходе волокна могут увеличить, уменьшить или оставить без изменения свою длину. Монотонную деформацию в

очаге пластического течения испытывают только волокна, находящиеся параллельно и перпендикулярно оси волочения в центральном слое заготовки. Величина и знак различия размеров двух волокон в очаге пластического формоизменения зависят от их первоначальных размеров, ориентации и удаления от оси волочения, а также степени их деформации и угла волочения. Расчеты показали, что при определенных значениях степени деформации проволоки может наблюдаться наибольшая неоднородность деформации волокон в поперечном сечении и во всем объеме пластической деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности: Учеб. пос. для вуз. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.
2. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т. 3. – М.: Металлургиздат, 1960. – 306 с.
3. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
4. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
5. Семавина А.Н., Гаврилюк В.Г., Терских С.А. и др. // Физ.-хим. механика материалов. АН УССР. Наукова думка 1979. № 2. С. 36 – 40.
6. Процив И.М., Гурьянов Г.Н., Иванов В.П. и др. // Физ.-хим. механика материалов. АН УССР. Наукова думка. 1985. № 5. С. 96 – 99.

© 2013 г. Г.Н. Гурьянов, О.С. Железков
Поступила 12 ноября 2012 г.