

УДК 539.4 + 620.178.3

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛИННОМЕРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ УПРОЧНЕНИЯ СОВМЕСТНЫМ РАСТЯЖЕНИЕМ И КРУЧЕНИЕМ

© 2012 А.А. Крюков, В.Е. Калугин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 30.10.2012

Проведено исследование одного из методов упрочнения длинномерных цилиндрических изделий, при реализации которого в приповерхностной области изделия наводятся благоприятные сжимающие остаточные напряжения за счет последовательного упругопластического деформирования сначала растяжением, а затем, при фиксации полученной при растяжении продольной деформации, кручением. Вместо существующих режимов упрочнения, включающих однократное кручение изделия, находящегося в состоянии растяжения, предложены новые режимы, заключающиеся в реверсивном кручении изделия, находящегося в состоянии растяжения. Разработаны новые технологические режимы, обеспечивающие оптимальное распределение остаточных нормальных напряжений по поперечному сечению изделия при минимальных значениях остаточных касательных напряжений. В результате проведенных сравнительных коррозионно-усталостных испытаний доказана высокая эффективность упрочнения совместным растяжением и реверсивным кручением.

Ключевые слова: *коррозионно-усталостные испытания, предел выносливости, циклическая долговечность, растяжение, кручение, упрочнение*

Для изделий, работающих в коррозионной среде в условиях циклического нагружения, крайне важными являются характеристики коррозионно-усталостной прочности. С целью повышения данных характеристик применяют разнообразные методы упрочнения. В работах [1-4] авторами данной статьи исследуется одна из технологий, применяемая для упрочнения длинномерных цилиндрических изделий. Она заключается в наведении в приповерхностной области изделия благоприятных продольных сжимающих остаточных напряжений за счет последовательного упругопластического деформирования сначала растяжением, а затем, при фиксации полученной при растяжении продольной деформации, кручением. В настоящее время данная технология применяется для восстановления работоспособности бывших в эксплуатации, но ещё не исчерпавших свой ресурс насосных штанг [5]. Упрочнение совместным растяжением и кручением обладает рядом преимуществ, отмеченных в [4], но при этом существующие режимы упрочнения, которые включают однократное кручение предварительно растянутого изделия,

нельзя считать эффективными. Из-за неоднородности начальных свойств по длине штанги появляется опасность образования шеек и даже разрушения по телу изделия в процессе упрочнения. Поэтому вводится ограничение на величину угла закручивания, что не позволяет навести достаточные значения остаточных напряжений, способные существенно повысить коррозионно-усталостную прочность и долговечность изделия. К тому же, кроме проведенных под руководством д.т.н., профессора Н.Н. Вассермана усталостных испытаний на нескольких восстановленных штангах [5], отсутствуют другие исследования, доказывающие действительную эффективность данной технологии. Эксперименты на новых штангах или лабораторных образцах не проводились. Сами возможности способа недостаточно глубоко изучены теоретически и крайне слабо подтверждены экспериментально. Между тем, изначальное упрочнение новых штанг с помощью эффективных режимов должно существенно повышать их циклическую долговечность, т.е. способствовать увеличению срока службы, а также надёжности безотказной работы в течение данного срока. Для нефтедобывающих компаний такая практика должна оказаться более рентабельной, чем восстановление бывших в эксплуатации штанг, многие из которых вообще не подлежат такому восстановлению.

Крюков Алексей Андреевич, старший преподаватель. E-mail: andreevich-alex@mail.ru
Калугин Вячеслав Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: veksopr@mail.ru

Цель работы: разработка таких режимов, которые с одной стороны сохраняют уже существующие преимущества способа, а с другой стороны позволят существенно повысить коррозионно-усталостную прочность и долговечность изделия.

Для определения эффективных режимов проведено исследование, центральной идеей которого являлось применить реверсивное кручение в процессе упрочнения. Вначале была построена математическая модель совместного упругопластического деформирования растяжением и кручением однородного цилиндрического изделия [1]. По результатам испытаний тонкостенных трубчатых образцов на растяжение, чистый сдвиг, а также совместное растяжение и кручение [2, 3] определены материальные параметры модели и подтверждена её адекватность. На основе модели деформирования цилиндрического изделия построена модель упрочнения стержня круглого сечения, позволяющая оценить распределение по сечению остаточных нормальных (σ_{os}) и остаточных касательных напряжений (τ_{os}), наведённых в процессе упрочнения [4]. Адекватность модели упрочнения подтверждена по результатам испытаний образцов круглого сечения. С помощью модели определены рациональные среди каждой из групп (растяжение и однократное кручение, растяжение и знакопеременное кручение, растяжение и реверсивное кручение со знакопостоянной амплитудой) режимы упрочнения для стержня из стали 15X2ГМФ.

Для подтверждения действительной эффективности подобранных рациональных режимов проведены сравнительные коррозионно-усталостные испытания, обсуждению результатов которых посвящена данная статья. Сравнивались три партии по 12-15 образцов: базовая неупрочнённая (№1), упрочнённая по рациональному режиму с однократным кручением (№2) и упрочнённая по рациональному режиму со знакопеременным кручением (№3). Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [6] на лабораторных гладких образцах диаметром 8 мм с цилиндрической рабочей частью длиной 20 мм, эскиз которых представлен на рис. 1.

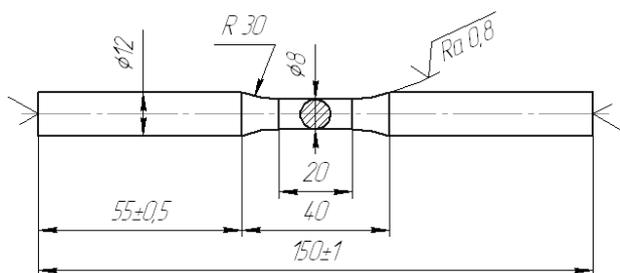


Рис. 1. Эскиз усталостного образца

Все образцы были изготовлены из сердцевины цилиндрических частей новых нефтенасосных штанг из стали 15X2ГМФ. При обработке результатов испытаний использовались индивидуальные размеры каждого образца с учетом их отклонения от базовых. Упрочнение партий №2 и №3 выполнено в Центре экспериментальной механики ПНИПУ на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850. Основными параметрами, контролируемыми при упрочнении, были величины деформаций и соответствующих им нагрузок. Регистрация относительных деформаций – продольной (ϵ) и угловой по внешнему диаметру (γ_{max}) осуществлялась в рабочей части образца на базе 10 мм с помощью навесного экстензометра, тем самым исключались погрешности измерения, обусловленные податливостью нагружающей системы и несовершенством закрепления образца в захватах. Через датчик силы синхронно с той же частотой проводилась регистрация нагрузок: осевого усилия и момента кручения.

На рис. 2 представлено сравнение экспериментальных и теоретических (полученных решением уравнений модели) зависимостей для образца из партии №2. На этом же рисунке показано распределение согласно модели остаточных напряжений по сечению после упрочнения. На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей для образца из партии №3. На рис. 4 представлены графики распределения согласно модели остаточных напряжений по сечению образца при соответствующем режиме упрочнения. В данном случае $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала, ϕ – абсолютный угол закручивания, который вычислялся исходя из известной величины γ_{max} .

Критерии благоприятного распределения остаточных напряжений и выявляемые по ним преимущества режимов упрочнения со знакопеременным кручением перед однократным подробно рассмотрены в [4]. Отметим кратко основные из этих преимуществ. На представленных рисунках видно, что и в случае режимов упрочнения с однократным кручением, и в случае режимов со знакопеременным кручением достигается большая глубина залегания остаточных сжимающих напряжений (около 1/3 радиуса от поверхности). И в том, и в другом случае обеспечивается выполнение условия прочности в сердцевине, а сама сердцевина остаётся упругой. Однако при упрочнении растяжением и знакопеременным кручением на поверхности удаётся навести в 2 раза большие по абсолютному значению остаточные сжимающие напряжения (-238 МПа против -122 МПа). При этом благодаря частичной третьей стадии кручения минимизируется

величина остаточных касательных напряжений. На рис. 4 (б) касательные напряжения вдоль радиуса не превышают величины 35 МПа, что практически на порядок меньше величины остаточных сжимающих напряжений, наведённых в приповерхностной области. В случае же режимов

упрочнения с однократным кручением в приповерхностной области наводятся и остаточные нормальные, и остаточные касательные напряжения одного порядка, что видно на рисунках 2 (в) и (г).

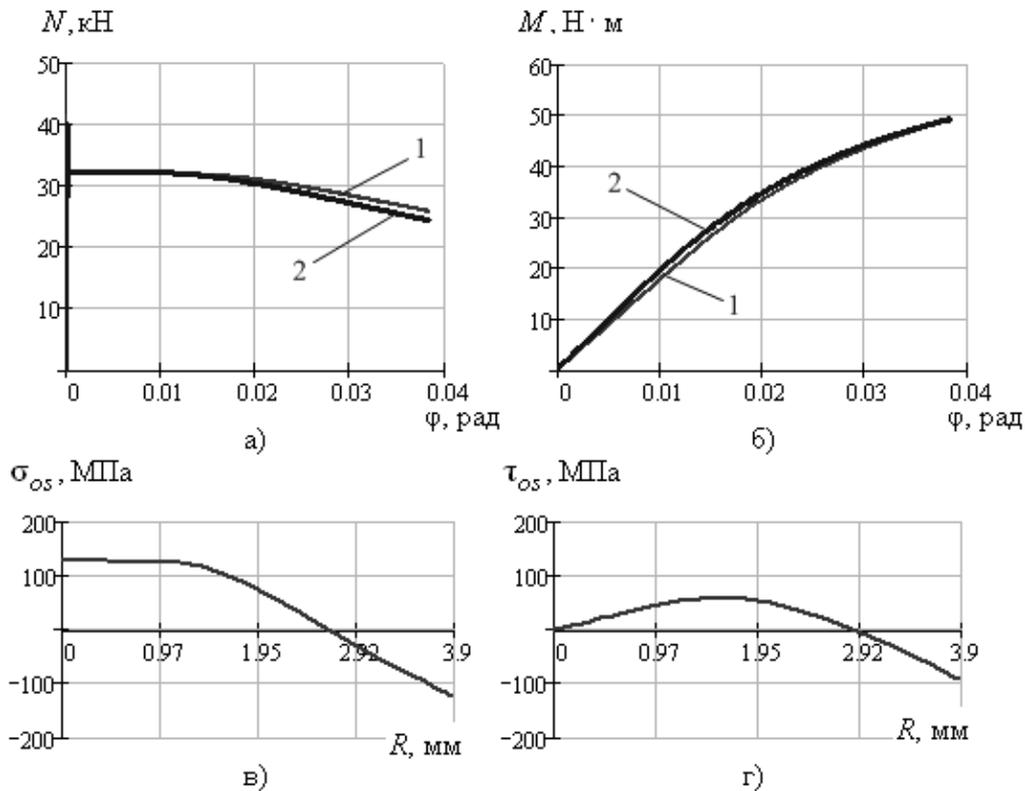


Рис. 2. Графики зависимостей:

а) продольной силы, б) крутящего момента от угла закручивания; распределения: в) остаточных нормальных, г) остаточных касательных напряжений по радиусу поперечного сечения образца из стали 15Х2ГМФ при его упрочнении в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, разгрузка до $\sigma=0,75 \cdot \sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\varphi=0,038$ рад ($\gamma_{\max}=0,0075$). 1 – модель, 2 – эксперимент.

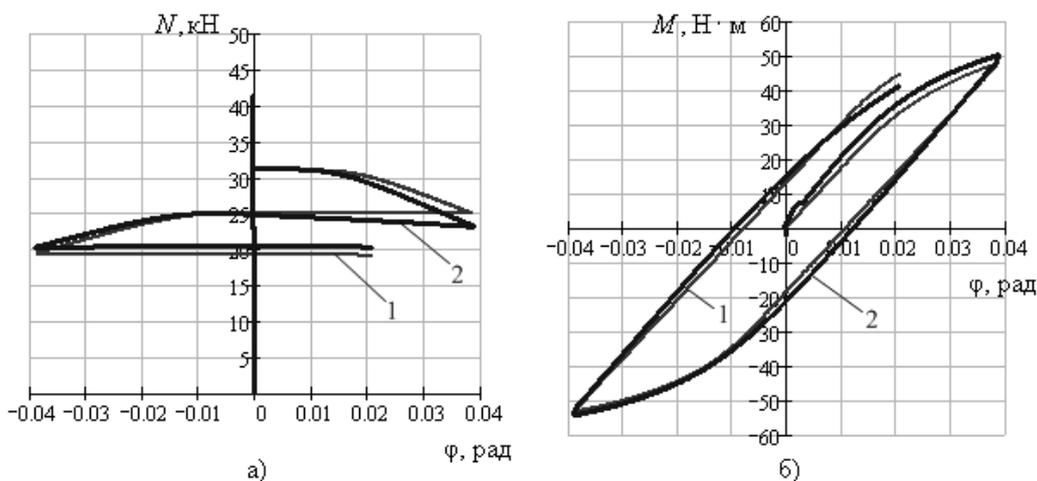


Рис. 3. Графики зависимостей:

а) продольной силы, б) крутящего момента от угла закручивания при упрочнении образца из стали 15Х2ГМФ в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, разгрузка до $\sigma=0,75 \cdot \sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\varphi=\varphi_a$ ($\varphi_a=0,039$ рад, $\gamma_{\max}=0,0075$), кручение в противоположную сторону до $\varphi=-\varphi_a$, кручение в первоначальном направлении до $\varphi=0,021$ рад ($\gamma_{\max}=0,004$). 1 – модель, 2 – эксперимент.

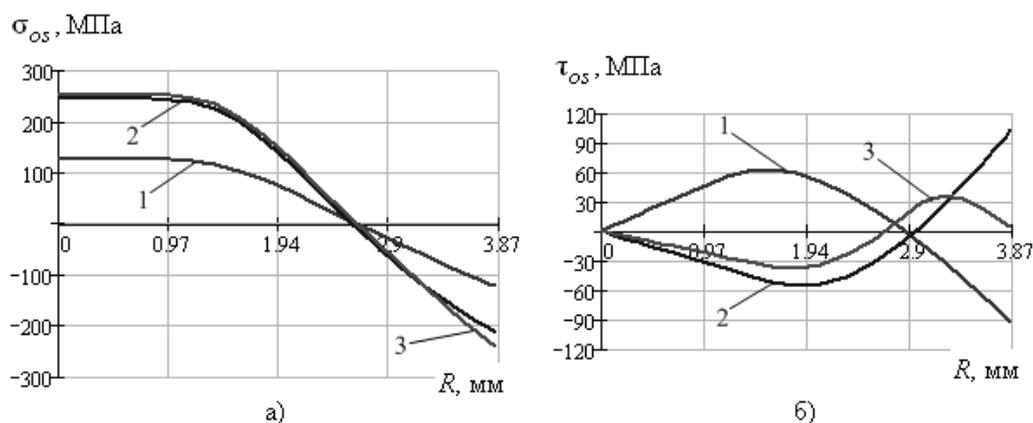


Рис. 4. Распределение остаточных нормальных (а) и остаточных касательных (б) напряжений по радиусу поперечного сечения образца из стали 15Х2ГМФ в случае возможной разгрузки после: 1 – первой, 2 – второй и 3 – третьей стадии кручения при упрочнении в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, разгрузка до $\sigma=0,75 \cdot \sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\varphi=\varphi_a$ ($\varphi_a=0,039$ рад, $\gamma_{max}=0,0075$), кручение в противоположную сторону до $\varphi=-\varphi_a$, кручение в первоначальном направлении до $\varphi=0,021$ рад ($\gamma_{max}=0,004$).

Усталостные испытания 3 партий образцов проведены в лаборатории усталостной прочности кафедры КМиТОМ ПНИПУ. Вид испытаний: консольный изгиб вращающегося образца в среде 3,5% раствора NaCl при симметричном мягком нагружении с частотой 50 Гц. Для получения результатов испытаний в исследуемой области долговечностей (от 10^6 до 10^7 циклов) применена стратегия метода вверх-вниз [7]. Для описания кривой усталости в коррозионной среде применено степенное уравнение вида:

$$N \cdot \sigma_{max}^{m1} = C, \quad (1)$$

где σ_{max} – уровень максимального напряжения цикла, а N – долговечность на соответствующем уровне напряжения. Параметры кривой усталости C и $m1$, соответствующие 50%-ной вероятности разрушения, находятся по результатам испытаний методом наименьших квадратов. При этом, вводя дополнительное предположение о постоянстве коэффициента $m1$ для всей выборки, а рассеяние результатов связывая с изменчивостью только параметра C , построены вероятностные диаграммы усталости. На рис. 5 представлены соответствующие диаграммы для вероятностей разрушения 10%, 50% и 90%.

Для партии образцов, упрочнённых по рациональному режиму совместного растяжения и однократного кручения, средневероятностный ограниченный предел выносливости на базе 10^7 циклов составил: $\sigma_{-1}=235,3$ МПа при среднеквадратичном отклонении $S\sigma_{-1}=13,48$ МПа. Это в 1,22 раза выше предела выносливости неупрочнённой партии, у которой $\sigma_{-1}=193$ МПа при $S\sigma_{-1}=15,08$ МПа. Долговечность, соответствующая 50%-ной вероятности разрушения, на сопос-

тавимых уровнях напряжений (270-210 МПа) повысилась в 1,5-2,5 раза по сравнению с неупрочнённой партией. При этом на уровнях напряжений выше 315 МПа, т.е. выше уровня пересечения кривых 1 и 2, долговечность наоборот уменьшилась.

Для партии образцов, упрочнённых по рациональному режиму совместного растяжения и знакопеременного кручения, предел выносливости составил: $\sigma_{-1}=318,8$ МПа при $S\sigma_{-1}=14,6$ МПа, что в 1,65 раза выше предела выносливости неупрочнённых образцов. Долговечность, соответствующая 50%-ной вероятности разрушения, на сопоставимых уровнях напряжений (330-290 МПа) повысилась в 5-10,5 раз по сравнению с неупрочнённой партией. Таким образом, подтверждается более высокая эффективность разработанных новых режимов упрочнения, заключающихся в знакопеременном кручении предварительно растянутого стержня с зафиксированной продольной деформацией, перед существующими режимами, включающими однократное кручение предварительно растянутого стержня с зафиксированной продольной деформацией.

Для изделий, работающих при асимметричном циклическом нагружении, вводится понятие приведённого напряжения (σ_{np}), как напряжения при симметричном нагружении, обеспечивающего ту же долговечность, что и при заданном асимметричном нагружении. Для материалов насосных штанг, работающих в коррозионной среде в основном при знакоположительных циклах нагружения, согласно ГОСТ 13877-96 [8] принята следующая формула для приведённого напряжения (формула И.Л. Фаермана):

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_a \cdot \sigma_{max}} = \sigma_a \sqrt{\frac{2}{1-R}}, \quad (2)$$

ГДЕ $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ – амплитуда напряжений,
 $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ – коэффициент асимметрии цикла.

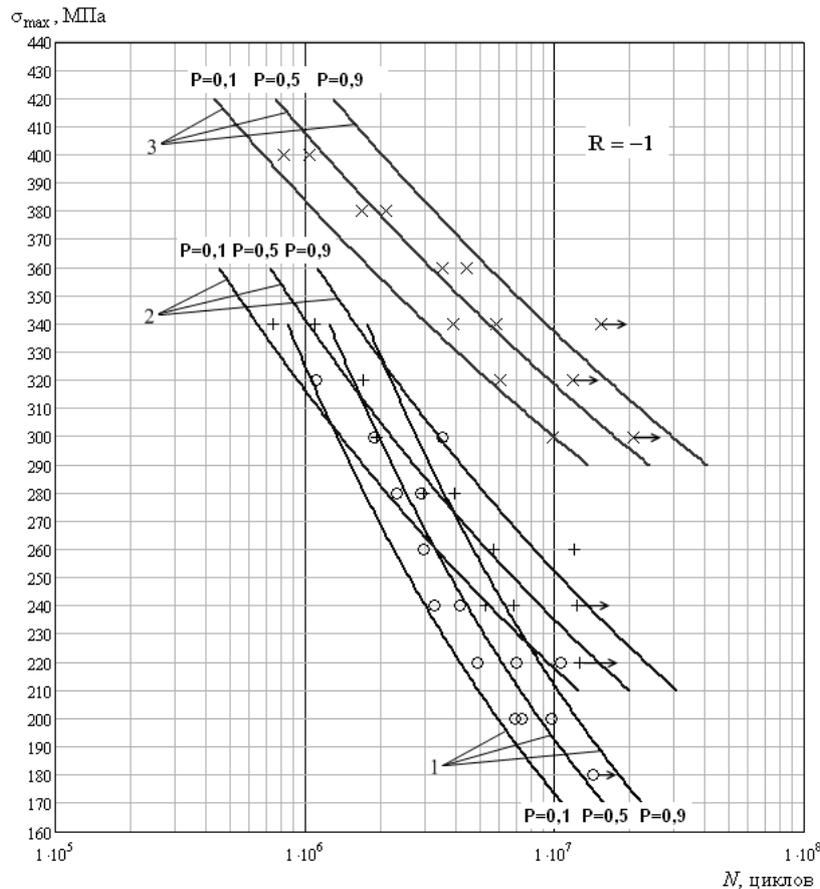


Рис. 5. Вероятностные диаграммы коррозионной усталости, построенные по результатам испытаний образцов из стали 15X2ГМФ в среде 3,5% р-ра NaCl:

1 – диаграммы, ○ – экспериментальные точки неупрочнённой партии образцов; 2 – диаграммы, + – экспериментальные точки партии образцов, упрочнённой по рациональному режиму совместного растяжения и однократного кручения; 3 – диаграммы, × – экспериментальные точки партии образцов, упрочнённой по рациональному режиму совместного растяжения и знакопеременного кручения; P – вероятность разрушения; → – образец не разрушился

Применим формулу (2) к случаю, когда характеристики цикла соответствуют пределу выносливости для заданной долговечности при коэффициенте асимметрии цикла R и наличии на поверхности остаточных напряжений σ_{os} . Тогда предельное напряжение будет равняться пределу выносливости при симметричном цикле нагружения (σ_{-1}), определенному на базе, равной заданной долговечности N_0 , а максимальное напряжение – сумме предела выносливости при заданном коэффициенте асимметрии (σ_R) и остаточного напряжения σ_{os} . Получаем уравнение:

$$\sigma_{-1} = \sqrt{(\sigma_R + \sigma_{os}) \cdot \sigma_R \cdot \frac{(1-R)}{2}} \quad (3)$$

Решая это уравнение относительно искомого предела выносливости, в результате получаем:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{-1}^2}{1-R} + \left(\frac{\sigma_{os}}{2}\right)^2} - \frac{\sigma_{os}}{2} \quad (4)$$

При известной величине остаточных напряжений, наведенных в приповерхностной области (σ_{os}), и известном σ_{-1} , определенном для неупрочнённой партии образцов на базе, равной заданной долговечности, по формуле (4) можно определить предел выносливости упрочнённого изделия на той же самой базе при коэффициенте асимметрии цикла R (σ_R). При сопоставлении с результатами рассмотренных выше испытаний формула (4) даёт завышенное значение σ_R с относительной погрешностью 8-10%. Данная погрешность является приемлемой, так как сами по себе характеристики усталостной прочности подвержены значительному разбросу, поэтому формулу (4) можно применять для прогнозирования

повышения предела выносливости в результате упрочнения совместным растяжением и кручением.

Выводы: разработанная технология упрочнения совместным растяжением и реверсивным кручением, подтвердившая свою высокую эффективность, может быть применена для повышения коррозионно-усталостной прочности насосных штанг, а также других длинномерных цилиндрических изделий, подвергающихся циклическому нагружению. В случае штанг необходимо корректировать область рациональных режимов упрочнения, учитывая неоднородность начальных механических свойств по длине изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Крюков, А.А.* Моделирование упругопластического деформирования конструкционной стали при сложном напряженном состоянии / *А.А. Крюков, В.Е. Калугин, Н.Н. Вассерман* // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2011. № 3 (31). С. 122-128.
2. *Вассерман, Н.Н.* Исследование закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при сложном напряженном состоянии / *Н.Н. Вассерман, В.Э. Вильдеман, А.А. Крюков, М.П. Третьяков* // Вестник Пермского гос. техн. ун-та. Механика. 2010. №2. С. 34-47.
3. *Вассерман, Н.Н.* Исследование поведения конструкционной стали при простых видах нагружения / *Н.Н. Вассерман, В.Е. Калугин, А.А. Крюков, М.П. Третьяков* // Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение и материаловедение. 2012. № 1. Т. 14. С. 41-50.
4. *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. Том 13, № 4 (4). С. 970-974.
5. *Вассерман, Н.Н.* Технология восстановления прямолинейности и упрочнения насосных штанг / *Н.Н. Вассерман, В.В. Семенов, В.Е. Калугин, Н.П. Надьмов* // Наука производству. 2000. № 5. С. 49-50.
6. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
7. *Школьник, Л.М.* Методика усталостных испытаний: Справочник. – М.: Металлургия, 1978. 301 с.
8. ГОСТ 13877-96. Штанги насосные и муфты штанговые.

INCREASE THE CORROSION-FATIGUE STRENGTH OF LONG SIZE CYLINDRICAL PRODUCTS AS A RESULT OF HARDENING BY COMBINED TENSION AND TORSION

© 2012 А.А. Kryukov, V.E. Kalugin

Perm National Research Polytechnical University

Research the one of the methods of long size cylindrical products hardening at which realization in pre-surface area of a product favorable compressing residual tension by consecutive elastic-plastic deformation at first by tension, and then, at fixing the longitudinal deformation received at tension, by torsion is carried out. Instead of the existing modes of hardening including single torsion of a product in tension condition, the new modes, consisting in reversible torsion of a product in tension condition, are offered. The new technological modes providing optimum distribution of residual normal tension on cross-section of a product at minimum values of residual tangent tension are developed. As a result of carried-out comparative corrosion and fatigue tests high efficiency of hardening is proved by combined tension and reversible torsion.

Key words: *corrosion-fatigue tests, endurance strength, cyclic durability, tension, torsion, hardening*