

**ЧЕРНЯТИН**

Александр Сергеевич
кандидат технических наук,
ассистент
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

CHERNYATIN

Alexander Sergeevich
Candidate of Engineering
Sciences, Assistant
(MSTU named
after N.E. Bauman)

**ШИРШОВ**

Анатолий Артемович
кандидат технических наук,
доцент
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

SHIRSHOV

Anatoliy Artemovich
Candidate of Engineering
Sciences, Assoc. Prof.
(MSTU named
after N.E. Bauman)

Повышение долговечности элементов конструкций посредством глубокого пластического деформирования*

А.С. Чернятин, А.А. Ширшов

Рассмотрено влияние предварительного пластического деформирования на долговечность по результатам численного исследования предварительного пластического деформирования окрестности отверстия в тонком образце обжатием плоским пуансоном с последующей полной разгрузкой и циклическим растяжением образца. Проведено сравнение долговечности образца после предварительного пластического деформирования с недеформированным предварительно образцом.

Ключевые слова: обжатие, пластическое деформирование, разгрузка, напряжения остаточные, циклическое нагружение, долговечность.

Improvement of Structural Elements Durability by Deep Plastic Deformation*

A.S. Chernyatin, A.A. Shirshov

The paper considers the influence of the preliminary plastic deformation on the durability based on the results of numerical studies of the preliminary plastic deformation in the vicinity of a hole in a thin sample by compression with a flat punch, followed by complete unloading and cyclic tension of the specimen. A comparison of the samples durability after the preliminary plastic deformation with the previously undeformed sample is given.

Keywords: crimping (bilateral compression), plastic deformation, unloading, residual stress, cyclic loading, durability.

Одна из актуальных задач различных отраслей машиностроения — повышение надежности и долговечности узлов и деталей конструкций. Причиной выхода конструкций из строя чаще всего является их усталостное разрушение, начинающееся от мест зарождения усталостных трещин, которыми могут быть различного рода отверстия. С помощью местного глубокого пластического деформирования (МГПД) в окрестности отверстия создают благоприятное поле остаточных напряжений, взаимодействие которого с рабочими напряжениями обеспечивает уменьшение максимальных напряжений в очаге концентрации напряжений, что эквивалентно снижению эффективного коэффициента концентрации напряжений.

Экспериментальные исследования, проведенные еще в 1980-х годах, показали эффективность применения местного глубокого пластического деформирования материала путем обжатия кромки отвер-

* Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 12-08-31153.

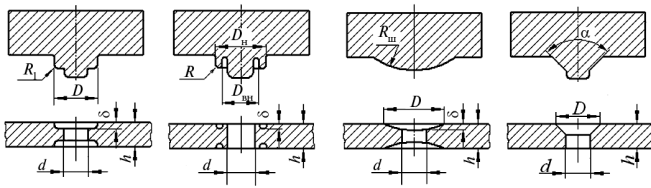


Рис. 1. Типы штампов для упрочнения окрестности отверстий:
вверху — профиль штампа; внизу — форма отпечатка;
 δ — глубина вдавливания штампа

стей штампами различной конфигурации [1–4] (рис. 1).

В работе [2] приведены результаты исследования влияния глубины внедрения плоского штампа при двухстороннем обжатии образца из сплава Д16Т на долговечность. Эскиз штампа и образца показан на рис. 1. Испытания образцов на выносливость проводили по пульсационному циклу ($R = 0$) со средним напряжением $\sigma_m = 145$ МПа по ослабленному сечению. Для каждого типоразмера было испытано по пять исходных образцов и пять упрочненных образцов для каждой глубины внедрения штампа δ . Установлено, что относительная долговечность (отношение среднего числа циклов до разрушения обжатых образцов к среднему числу циклов до разрушения исходных образцов) возрастает с увеличением глубины внедрения штампа δ более чем в 25 раз.

В работах [3, 4] показано, что в зависимости от внешней нагрузки существует оптимальная степень обжатия (глубина внедрения штампа δ) окрестности отверстия, при которой имеет место максимальная относительная долговечность.

Установление оптимальных параметров МГПД экспериментальным путем — длительная и трудоемкая операция. Поэтому представляет интерес создание методики определения оптимальных параметров МГПД расчетным путем. Решению данной задачи посвящена настоящая работа. В качестве примера взята модель образца в виде прямоугольной пластины 80×60 мм, толщиной $h = 10$ мм с центральным цилиндрическим отверстием диаметром $d = 8$ мм, которая симметрично обжимается с двух сторон плоским штампом с наружным

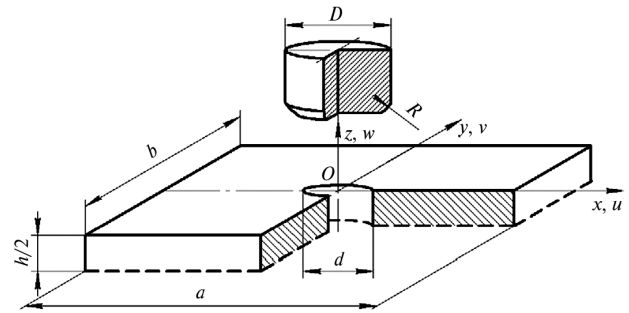


Рис. 2. Геометрические параметры модели

диаметром $D = 12$ мм. Радиус закругления кромки штампа $R = 1$ мм. Верхняя половина пластины со штампом показана на рис. 2.

Пластина выполнена из материала Д16Т, реальная диаграмма деформирования (зависимость интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций ε_i) которого показана на рис. 3 тонкой линией. При проведении расчетов приняты следующие упругие характеристики: $E = 7,8 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0,33$, $\sigma_T = 232$ МПа. Диаграмма деформирования аппроксимирована кусочно-линейной функцией, которая показана на рис. 3 штриховой линией. Штамп рассматривали как жесткое тело за счет выбора существенно завышенных упругих характеристик (по сравнению с Д16Т): $E = 7,8 \cdot 10^7$ МПа, $\nu = 0,49$.

Для решения поставленной задачи в среде ANSYS была разработана с учетом симметрии конечно-элементная модель, центральная

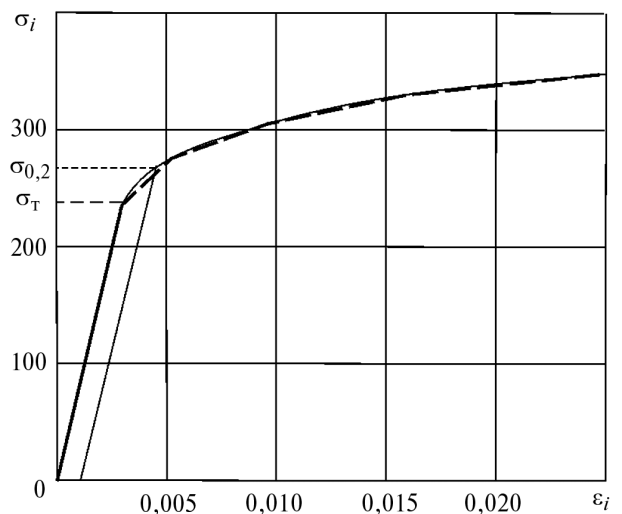


Рис. 3. Диаграмма деформирования сплава Д16Т и его кусочно-линейная аппроксимация

часть которой представлена на рис. 4. Модель разрабатывалась как параметрическая, строящаяся в результате исполнения макроса, написанного на языке APDL (язык высокого уровня среды ANSYS). Такой подход позволяет проводить комплексные исследования при варьировании различных параметров задачи, вплоть до выбора штампа произвольной формы.

Пластина и штамп разбиты на конечные элементы типа SOLID186 (квадратичный 20-узловой элемент параллелепипедной формы), а для создания контактной группы использовались элементы типов TARGE170 и CONTA174. В трех плоскостях симметрии z_0y , z_0x , x_0y (см. рис. 4) в узлах модели были запрещены перемещения u , v , w соответственно. Трение в зоне контакта не учитывалось.

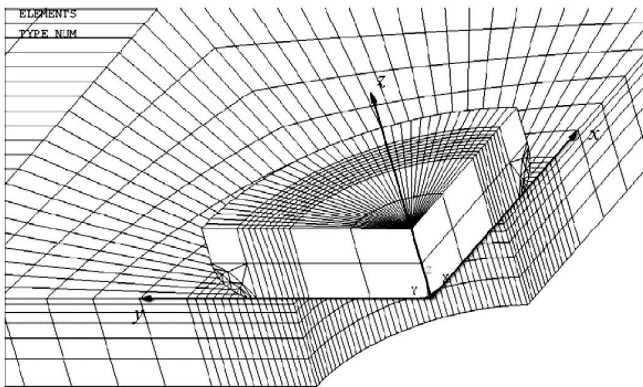


Рис. 4. Конечно-элементная модель пластины и штампа

Нагружение пластины производилось в два этапа:

1) двустороннее (симметричное) обжатие пластины плоскими штампами вдоль оси z (внедрение штампа составило 0,25 мм, что соответствует деформации $\varepsilon_z = 0,005$) и полная разгрузка пластины в результате отведения штампов в исходное положение;

2) один цикл нагружения пластины вдоль оси y растягивающим напряжением $\sigma_{y \max} = 50$ МПа с последующей разгрузкой до $\sigma_{y \min} = 5$ МПа (моделирование рабочей нагрузки), коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$.

Зависимость силы, прикладываемой к штампу, от глубины его внедрения при нагружении и разгрузке (отводе штампа) показана на рис. 5. Нелинейности на начальной стадии внедрения

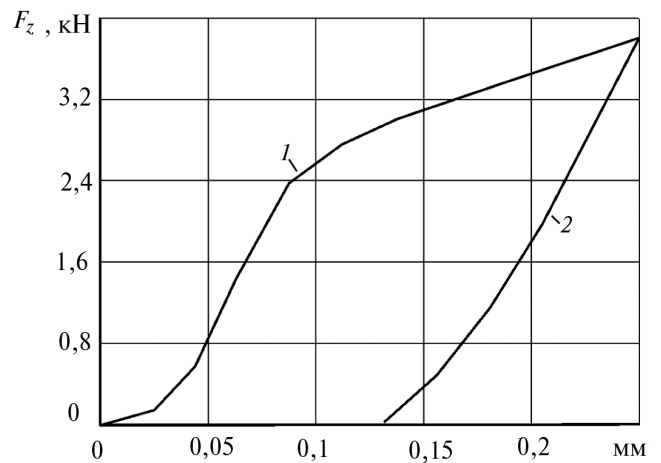


Рис. 5. Зависимость силы обжатия от величины его внедрения при вдавливании (1) и отведении (2) штампа

штампа и на конечной стадии разгрузки являются следствием изменения размеров площадки контакта из-за имеющейся у штампа скругленной кромки. При нагрузке больше 2400 Н в пластине возникают пластические деформации. Критерием образования пластических деформаций является условие

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{it} = \frac{2(1+\nu) \sigma_{\tau}}{3 E} = 2,64 \cdot 10^{-3}.$$

Эпюры осевых σ_z и окружных $\sigma_r = \sigma_x$ и радиальных $\sigma_t = \sigma_y$ напряжений вдоль оси x (плоскость zOx) в точках поверхности пластины при максимальном внедрении штампа и после полной разгрузки, т. е. остаточных напряжений, показаны на рис. 6. При внедрении штампа на 0,25 мм ($\varepsilon_z = 0,005$) точка с координатой $\bar{x} \approx 1,42$ оказывается практически на границе между поверхностью контакта и свободной поверхностью. Максимальный градиент напряжений имеет место в интервале $\bar{x} = 1,25 \dots 1,33$. Везде под штампом при обжатии наблюдается трехосное сжатие.

Характер распределения напряжений вдоль оси y аналогичен.

Эпюры окружных σ_t и радиальных σ_r напряжений в тех же точках поверхности пластины вдоль оси x при максимальном (толстые линии) и минимальном (тонкие линии) напряжениях цикла представлены на рис. 7. Как видно на эпюрах радиальные напряжения остаются положительными и изменяются мало. Окруж-

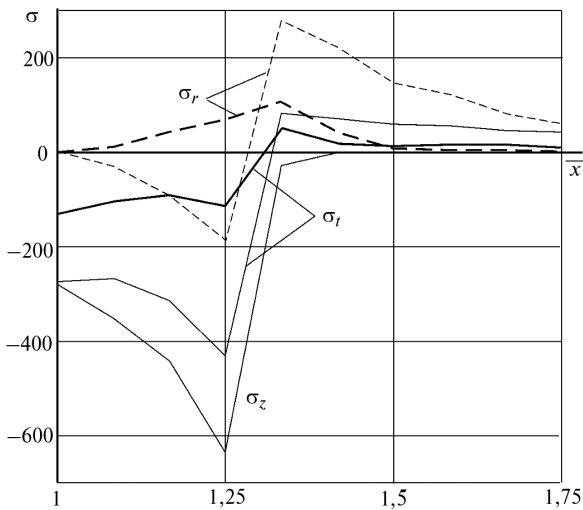


Рис. 6. Эпюры осевых σ_z (—), окружных σ_t (—) и радиальных σ_r (- - -) напряжений при максимальном внедрении штампа (тонкие линии) и после полной разгрузки (толстые линии): \bar{x} — расстояние от кромки отверстия в долях радиуса отверстия

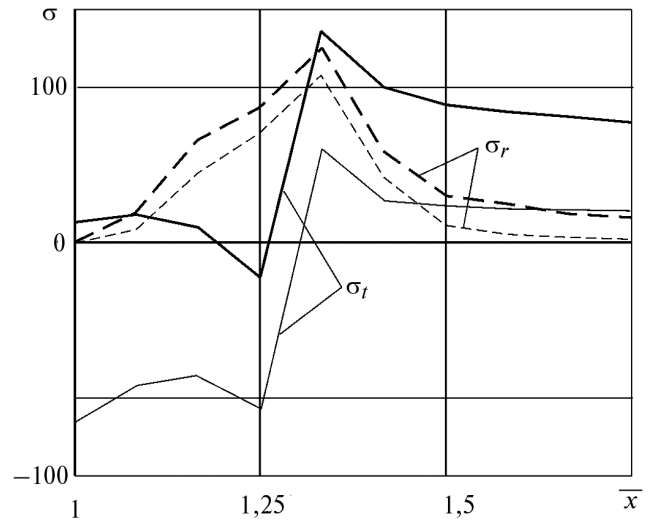


Рис. 7. Эпюры окружных σ_t (—) и радиальных σ_r (- - -) напряжений при циклическом нагружении

ные напряжения возрастают более существенно. Следует отметить тот факт, что из-за остаточных напряжений окружные и радиальные напряжения изменяются не пропорционально какому-либо параметру.

При расчетах на долговечность при регулярном нагружении коэффициенты запаса по напряжениям n_σ и числу циклов n_N связаны соотношением $n_N = n_\sigma^m$ [5], где m — угловой коэффициент прямой на диаграмме Велера в логарифмических координатах. Согласно [5] при асимметричных циклах

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}, \quad (1)$$

где $\sigma_{-1д}$ — предел выносливости детали, $\sigma_{-1д} = \sigma_{-1} / K_{\sigma д}$; σ_{-1} — предел выносливости материала; $K_{\sigma д}$ — эффективный коэффициент концентрации детали, $K_{\sigma д} = \frac{K_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta}$; K_σ — эффективный

коэффициент концентрации полированного образца с концентратором, определяемый экспериментально; ε_σ и β — масштабный коэффициент и коэффициент качества поверхности, принимаем произведение этих коэффициентов равным 0,8; σ_a , σ_m — амплитудное и среднее номинальные напряжения цикла; ψ_σ — коэффициент, учитываю-

щий влияние асимметрии цикла, который для легких сплавов можно рассчитать по корреляционной формуле $\psi_\sigma = (0,48...5,5) \cdot 10^{-4} \sigma_B$. Для сплава Д16Т $\sigma_B \approx 500$ МПа, т. е. принимаем $\psi_\sigma = 0,2$.

При отсутствии экспериментальных данных для определения K_σ можно использовать приближенное соотношение $K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1)$, где α_σ — теоретический коэффициент концентрации, рассчитываемый как отношение максимального напряжения в зоне концентратора к номинальному, определяемому без учета концентратора; q — коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений. Коэффициент чувствительности зависит не только от материала, но и от геометрии концентратора. При отсутствии надрезов у нормализованных или отоженных алюминиевых сплавов с радиусом кривизны в вершине концентратора более 0,6 мм значение q становится близким к 1 [6].

Выразим σ_a и σ_m через максимальное напряжение цикла σ_{max} и характеристику цикла R : $\sigma_a = \sigma_{max}(1 - R)/2$, $\sigma_m = \sigma_{max}(1 + R)/2$. Тогда формулу (1) можно представить в виде $n_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} \varepsilon_\sigma \beta}{\alpha_\sigma \sigma_{max} (1,2 - 0,8R)}$. Произведение $\alpha_\sigma \sigma_{max}$ есть не что иное как максимальное расчетное

напряжение σ_{\max}^* , а характеристика цикла определяется не по номинальным напряжениям, а по расчетным значениям минимального и максимального напряжений в наиболее опасной точке.

Для сравнения влияния МГПД на долговечность используем отношение $n_{\sigma_n} / n_{\sigma_{пд}}$. При этом через n_{σ_n} обозначены коэффициенты запаса по напряжениям, определяемый для точек контура отверстия, лежащих в плоскости zOx пластины (см. рис. 2), не подвергнутой МГПД, а $n_{\sigma_{пд}}$ — для пластины подвергнутой МГПД в наиболее опасных точках, при одинаковых напряжениях цикла. Назовем отношение $n_{\sigma_n} / n_{\sigma_{пд}}$ коэффициентом увеличения долговечности K_R , т. е.

$$K_R = \frac{\sigma_{\max_{пд}}^* (1,2 - 0,8R_p)}{\sigma_{\max_n}^* (1,2 - 0,8R_n)} \quad (2)$$

Здесь индексом «пд» отмечены расчетные величины для пластины, подвергнутой МГПД, а индексом «н» — не подвергнутой МГПД.

При растяжении образца без предварительного пластического деформирования наиболее нагруженными являются точки на кромке отверстия в плоскости zOx (см. рис. 2). При растяжении после пластического деформирования, как показали расчеты, материал в плоскости zOx также нагружен больше, но в зависимости от глубины обжатия и уровня растягивающих напряжений наиболее нагруженная точка может располагаться на некотором удалении от кромки отверстия, причем, ее положение заранее не известно. При расчетах на выносливость критерием максимальной нагруженности может служить коэффициент запаса по напряжениям n_{σ} . В точках на кромке отверстия напряженное состояние одноосное и вычисление n_{σ} не представляет трудностей. Достоверные методы расчета долговечности при трехосном напряженном состоянии особенно при непропорциональном изменении компонент тензора напряжений отсутствуют. Поэтому ограничимся сравнительным анализом долговечности по напряжениям на поверхности в плоскости zOx .

Вследствие симметрии радиальные и окружные напряжения являются главными, причем,

средние значения окружных напряжений $\sigma_{t,m}$ отрицательны. В таких условиях использование эквивалентных напряжений, которые по определению всегда положительны, может привести к противоречивым результатам. Поэтому расчет долговечности будем проводить отдельно по радиальным и окружным напряжениям. Как видно из эпюр, представленных на рис. 8, радиальные напряжения мало изменяются и их амплитудные значения очень малы. Результаты вычисления K_R по формуле (2) в точках вдоль оси x по окружным напряжениям приведены на рис. 8. В знаменатель формулы (2) подставлены значения напряжений в точке контура ($\sigma_{\max_n}^* = 153$ МПа, $R_n = 0,1$). Отметим, что на контуре отверстия ($\bar{x} = 1$) $K_R = 1,57$, а при $\bar{x} = 1,33$ $K_R = 1,46$. Учитывая, что коэффициент m у алюминиевых сплавов примерно равен 5, то можно ожидать повышение долговечности на порядок.

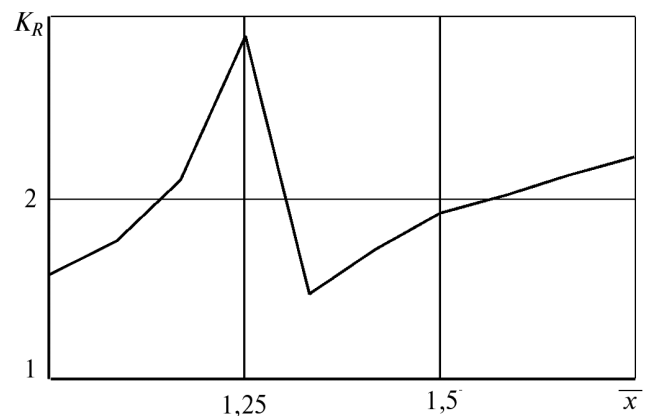


Рис. 8. Зависимость коэффициента увеличения долговечности K_R , вычисленного по окружным напряжениям, от расстояния от кромки отверстия

Таким образом, приведенный пример расчета плоского образца с отверстием, обжатым плоским пуансоном, показывает положительное влияние предварительного пластического деформирования на долговечность. Значительное увеличение долговечности можно обеспечить за счет более точного подбора параметров пуансона и степени обжатия, однако их выбор зависит в первую очередь от рабочей циклической нагрузки. Использование других типов пуансонов, показанных на рис. 1, также может способствовать существенному повышению

долговечности элементов конструкций с отверстиями. Однако ограниченные рамки статьи не позволяют рассмотреть вопросы выбора оптимальных параметров пуансона и процесса.

Литература

1. Ярковец А.И., Кравченко Ю.А., Юшин В.А. Повышение ресурса потайных болтовых соединений способом упрочнения отверстий пластическим деформированием // *Авиационная промышленность*. 1977. № 1. С. 14–16.
2. Шахатуни Е.А., Любарец Ф.М. Увеличение выносливости самолетных конструкций путем обжатия вокруг отверстий цилиндрических поясов // *Авиационная промышленность*. 1977. № 9. С. 12–13.
3. Шахатуни Е.А., Любарец Ф.М., Литвиненко А.Е. Повышение выносливости зенкованных отверстий холодным обжатием // *Авиационная промышленность*. 1980. № 2. С. 6–7.
4. Местное глубокое пластическое деформирование как средство повышения долговечности элементов конструкций / В.А. Борог, С.Я. Сорокин и др. // *Авиационная промышленность*. 1981. № 6. С. 5–12.
5. Кogaев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
6. Коллинз Дж. Повреждение металлов в конструкциях. М.: МИР, 1984. 624 с.

References

1. Iarkovets A.I., Kravchenko Ju.A., Iushin V.A. Povyshenie resursa potainykh boltovykh soedinenii sposobom uprochneniia otverstii plasticheskim deformirovaniem [Improving resource hiding bolting method of hardening holes plastic deformation]. *«Aviatsionnaia promyshlennost'»*, 1977, no. 1, pp. 14–16.
2. Shakhatuni E.A., Liubarets F.M. Uvelichenie vyнослиivosti samoletnykh konstrukttsii putem obzhatiiia vokrug otverstii tsilindricheskikh poiasov [Increase endurance aircraft designs compression cylindrical zone around the ports]. *«Aviatsionnaia promyshlennost'»*, 1977, no. 9, pp. 12–13.
3. Shakhatuni E.A., Liubarets F.M., Litvinenko A.E. Povyshenie vyнослиivosti zenkovannykh otverstii kholodnym obzhatiem [Increasing stamina countersunk holes cold compression]. *«Aviatsionnaia promyshlennost'»*, 1980, no. 2, pp. 6–7.
4. Borog V.A., Sorokin S.Ia. Mestnoe glubokoe plasticheskoe deformirovanie kak sredstvo povysheniia dolgovechnosti elementov konstrukttsii [Local and other deep deformation as a means of improving durability of structural elements]. *«Aviatsionnaia promyshlennost'»*, 1981, no. 6, pp. 5–12.
5. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. *Rascheti detalei mashin i konstrukttsii na prochnost i dolgovechnost'* [Calculations of machine parts and structures for strength and durability]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 224 p.
6. Kollinz Dzh. *Povrezhdenie metallov v konstrukttsiiakh* [Damage to metal structures]. Moscow, MIR publ., 1984, 624 p.

Статья поступила в редакцию 06.12.2012

Информация об авторах

ЧЕРНЯТИН Александр Сергеевич (Москва) — кандидат технических наук, ассистент кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Россия, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: cas@inbox.ru).

ШИРШОВ Анатолий Артемович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Россия, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: chirchvaa@mail.ru).

Information about the authors

CHERNYATIN Alexander Sergeevich (Moscow) — Candidate of Engineering Sciences, Assistant of «Applied Mechanics» Department. MSTU named after N.E. Bauman. (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia, e-mail: cas@inbox.ru).

SHIRSHOV Anatoliy Artemovich (Moscow) — Candidate of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of «Applied Mechanics» Department. MSTU named after N.E. Bauman. (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia, e-mail: chirchvaa@mail.ru).