

УДК 621.384.3

Ю.В. ВАСИЛЕВИЧ, д-р физ.-мат. наук, проф.

заведующий кафедрой «Сопrotивление материалов машиностроительного профиля»¹

Е.А. МОЙСЕЙЧИК, канд. техн. наук, доц.

доцент кафедры информационных технологий и физико-математических дисциплин²

А.Е. МОЙСЕЙЧИК

преподаватель кафедры «Сопrotивление материалов машиностроительного профиля»¹

E-mail: alexmoiseychik@gmail.com

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь²Барановичский государственный университет, г. Барановичи, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19.01.2018.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ГРУППОВЫМИ ВЫТОЧКАМИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

В статье показано, что в корне прямоугольных выточек растянутых стальных цилиндрических стержней круглого сечения, содержащих группы равно отдаленных между собой выточек с одинаковой геометрией, с увеличением расстояния между выточками относительное сужение в месте разрушения уменьшается в полтора и более раз при изменении отношения ширины выступов к ширине выточек от 1 до 4. Получено, что при постоянной скорости деформирования конкретного элемента изменение температуры его точек будет пропорционально напряжениям, действующим в элементе. Установлено, что в цилиндрических стержнях из низкоуглеродистой стали с группами выточек и выступов по длине, находящихся под действием возрастающей нагрузки, можно определять тепловым методом с вероятностью не ниже 95% возникновение зон предельных состояний, участков зарождения трещин и их развития в элементах.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, цилиндрические образцы, групповые выточки, деформирование, теплообразование

Введение. В работах [1–10] показано, что проблема обеспечения работоспособности растянутых резьбовых соединений до настоящего времени актуальна. Это связано с многообразием условий работы традиционных резьбовых соединений из стали [1, 2], широким применением резьбовых соединений в ответственных узлах энергетических установок, сооружений [3–6], использованием новых материалов для резьбовых соединений [7–10]. Вместе с тем работа таких соединений в предельном состоянии, при достижении упруго-пластических деформаций, недостаточно изучена [1–10]. Так, аварии на объектах энергетики активизировали исследования действительной работы шпилек больших диаметров, изучение кинетики их напряженно-деформированного состояния и оптимизацию формы [3–5]. В статье [3] отмечается, что для ответственных резьбовых соединений энергетических установок важное значение может иметь температурный фактор. Установлено, что при конструировании шпилек больших диаметров следует учитывать неоднородность механических свойств стали по объему, масштабный фактор, вести мониторинг их работоспособности [4, 5]. Применение титана и других

легких и прочных металлов и композитов для разъемных соединений авиационной и ракетной техники требует комплексного исследования их конструкционной прочности [7].

Целью настоящей статьи является рассмотрение особенностей деформирования растянутых цилиндрических стержней из низкоуглеродистой стали с групповыми выточками и сопоставление результатов расчетного моделирования с данными ИК-термографии.

Модель деформирования стержня с выточкой.

В стержнях с выточками перемещения траверсы разрывной машины приводят к различной скорости деформирования стали в выточке. На рисунке 1 приведена поясняющая схема. Представим

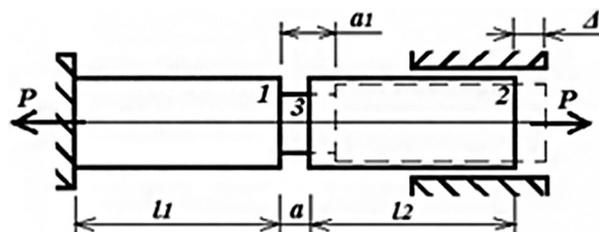


Рисунок 1 — Схема деформирования растянутого стержня с одиночной выточкой

образец с одиночной выточкой и схему его деформирования в соответствии с рисунком 1. Суммарное увеличение расчетной длины при упругой работе материала составит:

$$\Delta = \frac{P(l_1 + l_2)}{EA} + \frac{Pa}{EA_3} = \varepsilon_3 a \left[\frac{(l_1 + l_2) A_3}{a A} + 1 \right] = \varepsilon_3 k, \quad (1)$$

где P — сила растяжения образца; l_1, l_2, a — длина участков стержня; A_1, A_2, A_3 — площадь поперечных сечений элементов 1, 2, 3; E — модуль упругости; ε_3 — относительное удлинение участка 3; k — произведение a на выражение в квадратных скобках. Величина Δ зависит от скорости подвижной траверсы машины и других факторов, используемых в нижеприведенной формуле:

$$\Delta = v_{tr} \tau k_1, \quad (2)$$

где v_{tr} — скорость движения траверсы; τ — время движения траверсы до момента достижения напряжениями в сечении предела упругости; k_1 — коэффициент, учитывающий фактическую геометрию образца.

Коэффициент $k_1 \geq 1$ и учитывает фактические перемещения участков образца. Его значение для конкретного образца определяется экспериментально. В момент времени t^* материал в ослабленном сечении вступит в пластическую фазу работы. Эта величина определяется из равенства выражений (1) и (2):

$$\tau^* = \varepsilon^3 k / v_{tr} k_1.$$

Допустим, что при пластической стадии работы материал образца сохраняет однородность и сплошность. При этом условии на участке с выточкой при упругой и пластической стадиях работы в каждый момент времени τ выполняется условие неизменности объема $V_y = V_p$:

$$V_y = A_3 a^* = V_p = A_p [v_p (\tau - \tau^*) + a^*],$$

где A_p — площадь поперечного сечения выточки при пластической стадии работы материала; a^* — начальная длина деформируемого участка выточки; v_p — скорость пластической деформации в выточке.

Развитие пластической деформации в выточке происходит по механизму, изложенному в [8]. Плотность энергии пластического деформирования материала выточки:

$$w = \frac{P v_{tr}}{A_p [v_p (\tau - \tau^*) + a^*]} = \frac{\sigma^* v_{tr}}{v_p (\tau - \tau^*) + a^*}. \quad (3)$$

При фиксированной скорости движения траверсы плотность энергии деформирования ма-

териала выточки будет пропорциональна σ^* . Так как энергия пластической деформации w превращается в тепловую и вызывает нагрев материала в точках с плотностью энергии w , то величина изменения температуры (Δt) в этих точках будет равна:

$$\Delta t = \frac{\eta w}{c\rho} = \frac{\eta \sigma^* v_{tr}}{c\rho v_p (\tau - \tau^*) + a^*}, \quad (4)$$

где c — теплопроводность; ρ — плотность материала; η — коэффициент выхода тепла.

Из формулы (4) следует, что при постоянной скорости деформирования конкретного элемента изменение температуры его точек будет пропорционально напряжениям σ^* в элементе.

Цилиндрические образцы с групповыми выточками и особенности их испытания. Условия деформирования материала стержня в корне выточек и теплообразование в нем изменятся, если стержень будет содержать не одну выточку, а их группу. Характеристики материала экспериментальных стержней приведены в таблице 1. Для моделирования приняты 2 серии образцов стержней «гг» с различным количеством выточек-выступов. Образцы серий 1 и 2 показаны соответственно на рисунке 2 и в таблице 1.

В процессе экспериментальных исследований нагружение образцов и моделей из низкоуглеродистой стали производилось квазистатически и ускоренно, растягивающим усилием до разрушения на испытательной машине Р-100 при скоростях движения захватов от 0,049 до 0,9 мм/с с записью диаграммы «нагрузка — удлинение». Испытания и обработка результатов проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84. Процесс деформирования образцов отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000», который представляет собой прецизионный оптико-механический сканирующий инфракрасный прибор для визуализации и измерения тепловых полей. Применение особых методов сканирования, таких как

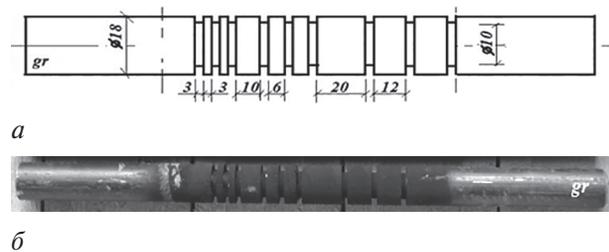


Рисунок 2 — Геометрическая схема (а) и общий вид (б) стержня типа «гг» (1 серия)

Таблица 1 — Химический состав и механические свойства стали стержня «гг»

Химический состав, %									Механические свойства		
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	As	N	σ_u , МПа	σ_y , МПа	δ , %
0,19	0,19	0,61	0,009	0,008	0,06	0,1	0	0,09	480	315	39

суммирование кадров и усреднение, повышает чувствительность прибора до $0,02^\circ\text{C}$. Встроенный программный пакет позволяет визуализировать термоизображение в реальном времени, реализовывать различные режимы (остановки кадра для предварительного анализа, записи динамического термографического фильма, отдельных термограмм, измерения температур, автонастройки динамического диапазона, учета коэффициента отражения, выбора различных палитр температур, покадрового суммирования и другие). Параллельно выполнялось фотофиксирование процесса деформирования стержней. Обработка результатов термографирования, определение температурных полей поверхности образцов велась по программному пакету IRTIS. После их разрушения измерялись геометрические размеры (длины, изменения поперечных сечений, перемещения на контрольных участках) и сопоставлялись с начальными, фотографировались характерные виды стержней и их фрагментов, изломы.

Методика исследования процесса деформирования стальных стержней «gr» при силовом нагружении основана на регистрации теплового излучения с поверхности при помощи тепловизионной камеры ИРТИС-2000 в начальный момент (начальный кадр) и в произвольный момент испытаний. Полученные таким образом данные позволяют характеризовать различные стадии деформирования в исследуемой зоне поверхности образца и судить о наступлении локальных пластических деформаций, зарождении разрушения и исследовать изменение зон пластических деформаций в закритической стадии деформирования. В принятой методике основное внимание уделено снижению погрешностей измерения за счет строгого выполнения регламента измерений и их обработки. Расстояние от камеры до образца L зависит от размеров исследуемой области a и угла β между нормалью к поверхности и осью визирования тепловизора $a = 2 \cdot L \cdot \text{tg}(\beta/2)$. Разрешение R определяется отношением

$$R = a_{\max} / n_{\max},$$

где a — линейный размер области исследования, n — степень дискретизации матрицы по горизонтали или вертикали.

Для тепловизионной камеры «ИРТИС 2000» при $L = 1$ м (среднее расстояние в эксперименте) и $\alpha_1 = 25^\circ$ по горизонтали и $\alpha_2 = 20^\circ$ по вертикали получаем, что максимальный линейный размер исследуемой области составляет $0,44 \times 0,35$ м, а предельное разрешение $R_{\max} = 0,7$ мм для данного типа матрицы (640×480). Для исследования образцов с большими линейными размерами необходимо применение тепловизоров с более высокой степенью дискретизации. Необходимо, чтобы шероховатость поверхности рабочей части образцов была равномерной. Для получения

поверхности со степенью черноты $\varepsilon \rightarrow 1$ целесообразно зачернить поверхность, обработанную токарным резцом (рисунок 2 б).

Измеряемая тепловизором в исследуемой точке температура T_p всегда меньше действительной температуры T в k_ε раз. Для окисленных, зачерненных, покрытых окалиной и т. п. поверхностей с $\varepsilon = 0,7-0,95$ этот коэффициент равен:

$$k_\varepsilon = T / T_p = 1,09 - 1,01,$$

где ε — коэффициент излучения (черноты) исследуемой поверхности.

Неопределенность при бесконтактном измерении температуры тела могут внести и другие факторы, подробно проанализированные в [9]:

- 1) неоднородность ε по площади;
- 2) угол между нормалью к поверхности и направлением визирной оси;
- 3) внешняя подсветка поверхности.

Фактор 1) возникает при изменении начального состояния поверхности в процессе деформирования (растрескивание окалины, покрытия). Небольшие полости (фактор 1) повышают ε . Относительно второго фактора в [10] отмечается, что в большинстве случаев в поле зрения тепловизора будет попадать участок поверхности с нормалью, направленной на объектив прибора, что позволяет определить наибольшие величины температур. Уменьшить влияние внешнего излучения можно тремя способами:

- 1) увеличением шероховатости поверхности;
- 2) уменьшением коэффициента отражения при зачернении;
- 3) изоляцией системы «тепловизор — образец» от внешних источников излучения и от бликов тепловизионной камеры.

Для устранения бликов от камеры необходимо ее визирную ось направлять под некоторым углом к нормали плоскости образца, большим β_1 , равным

$$\beta_1 = \arctg(a / 2L),$$

где a — линейный размер образца; L — расстояние до образца.

Таким образом, в предельном случае при $a_{\max} = 0,44$ м и $L_{\min} = 1,5$ м угол составляет $b \approx 8,5^\circ$. Наши эксперименты показали, что тепловизионную камеру необходимо устанавливать под несколько большим углом ($10 \div 15^\circ$). Для исключения случайных ошибок измерения температуры из-за колебаний ε при малых перемещениях целесообразно пользоваться операцией вычитания кадров в процессе обработки результатов термографирования.

Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния стержней «gr». Для построения твердотельных моделей исследуемых образцов использовалась программа геометрического моделирования SolidWorks. Выполненные модели сохранялись в формате «.x_t»

Таблица 2 — Схема и конечно-элементная модель образца 2-й серии

Наименование	Виды образца 2-й серии и ее конечно-элементная модель
Схема	
Конечно-элементная модель	

(формат Parasolid), который впоследствии использовался для импорта сторонней геометрии в ANSYS. При создании конечно-элементной сетки в препроцессорной подготовке с использованием функции автоматического разбиения могут возникать ошибки. Для их минимизации необходимо оптимально выбрать форму элемента, его размеры. В местах значительных градиентов напряжений производилось измельчение сетки. Размер конечных элементов в области концентрации не превышает 0,4 мм. В процессе расчетов используется критерий (теория) прочности Губера–Мизеса, который удовлетворительно отображает предельное состояние пластичных сталей. Для расчета использовались данные истинной диаграммы растяжения, учитывающей уменьшение поперечного сечения в процессе нагружения образца. Истинную диаграмму напряжений получали из условной для стадии равномерного деформирования образца, исходя из условия неизменности объема материала при пластическом деформировании. При расчете учитывались следующие факторы:

1) увеличивающаяся с постоянным шагом нагрузка с максимальным значением, соответствующим достижению предела прочности в области концентрации с точностью до 0,5% от временного сопротивления стали;

2) крепления расчетной модели образца принимались, исходя из работы его в системе «машина — образец».

Конечно-элементная модель образца 2-й серии приведена в таблице 2.

Результаты расчета образцов «gr» обеих серий по программе ANSYS приведены в таблицах 3 и 4. Из рисунка 2 а, таблиц 3 и 4 следует, что при наличии различных групп выточек в растянутом стержне текучесть материала в предельном состоянии наступает в той группе выточек, у которой отношение ширины выточек к ширине выступов равно единице. Эти выточки характеризуются наибольшими перемещениями и накопленной энергией пластической деформации при растяжении стержней.

Данные таблиц 3 и 4 и рисунка 3 показывают, что наименьшее стеснение пластическим деформациям оказывают ребра трехмиллиметровой ширины. При увеличении ширины примыкающих к выточкам ребер уменьшение характеристик пластичности затухает с ростом ширины ребер жесткости. Сдерживающее действие ребра жесткости на процесс пластического деформирования выточек, очевидно, зависит не только от ширины ребра, но и от отношения диаметров выточки и ребра жесткости. При величине этого отношения, близком к единице, работают многие

Таблица 3 — Распределение напряжений, деформации и плотности энергии при предельном состоянии образца «gr» 1-й серии

Наименование характеристики	Распределение характеристики по диаметральному сечению образца «gr»
Эквивалентные напряжения, Па (по Мизесу)	<p>.437E+08 .897E+08 .136E+09 .162E+09 .228E+09 .273E+09 .319E+09 .365E+09 .411E+09 .457E+09</p>
Энергия пластической деформации, Дж	<p>-.185E-06 .680E+07 .136E+08 .204E+08 .272E+08 .340E+08 .408E+08 .476E+08 .544E+08 .612E+08</p>
Эквивалентные пластические деформации	<p>-.709E-15 .018303 .036605 .054908 .073211 .091513 .109816 .128118 .146421 .164724</p>

Таблица 4 — Распределение напряжений, деформации при пластической деформировании в диаметральном сечении образцов 2-й серии

Наименование характеристики	Распределение характеристики по диаметральному сечению образца «gr»
Нормальные напряжения σ_y , Па	
Нормальные напряжения σ_x , Па	
Эквивалентные напряжения (по Мизесу), Па	
Перемещения по оси x, мм	
Эквивалентные пластические деформации	

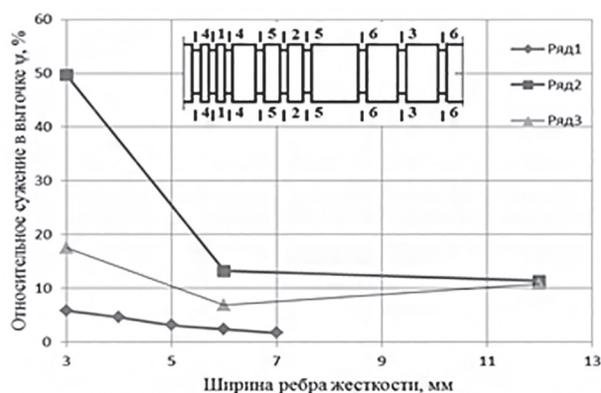


Рисунок 3 — Изменение относительного сужения в выточке при росте ширины ребра: ряд 1 — расчетное сужение конечно-элементной модели образца 1-й серии в выточках между ребрами одинаковой ширины; ряд 2 — сужение экспериментального образца «gr» 1-й серии в сечениях 1-1, 2-2, 3-3; ряд 3 — сужение экспериментального образца «gr» 1-й серии в сечениях 4-4, 5-5, 6-6

резьбовые соединения. В стержне болта таких соединений из пластичной стали в предельном состоянии образуется шейка (рисунок 4 а), в резьбовой части болтов из малопластичной стали зарождается начальная трещина и происходит хрупкий долом стержня (см. рисунок 4 б).

По результатам испытания образцов типа «gr» (рисунок 5) можно в первом приближении уста-

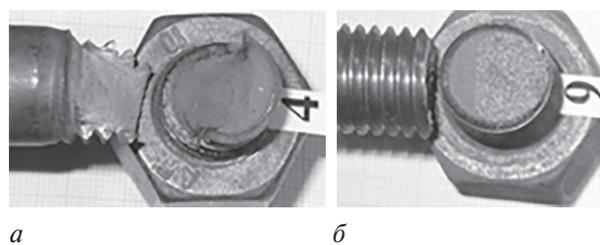


Рисунок 4 — Примеры изломов в резьбовой части стержней болтов: а — пластичная (образец 4); б — хрупкая сталь (образец 9)

новить, как сказывается на локализации пластической деформации и развитии шейки объем примыкающего к выточке металла. Из рисунка 5 следует, что в стержне с кольцевыми ребрами жесткости возможна локализация пластической деформации, образование и развитие шейки. Также видим, что шейка образуется в выточках, ширина которых соизмерима с шириной выточки. Такое ребро жесткости участвует в процессе локального деформирования и образования шейки в стержне. При этом диаметр ребра жесткости уменьшился, его боковая поверхность получила уклон α (см. рисунок 5 з). Эти признаки свидетельствуют о том, что ребро жесткости (выступ) участвует в пластическом течении смежных выточек, оказывая сдерживающее действие на процесс образования шейки. Материал уступа

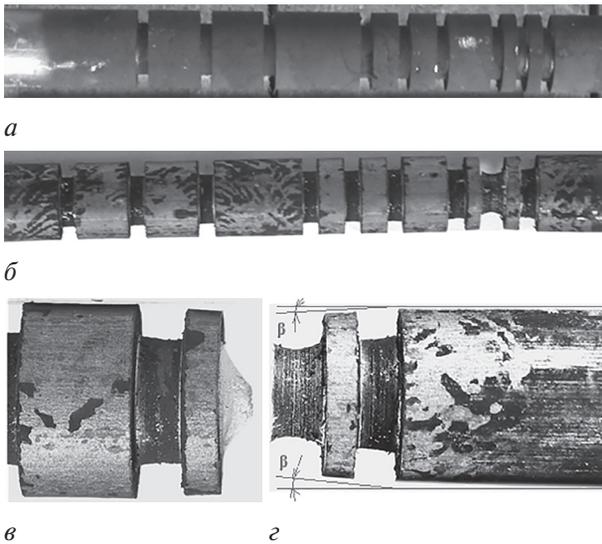


Рисунок 5 — Виды образца типа «гг» до и после деформации и схемы деформирования зон, примыкающих к излому образца

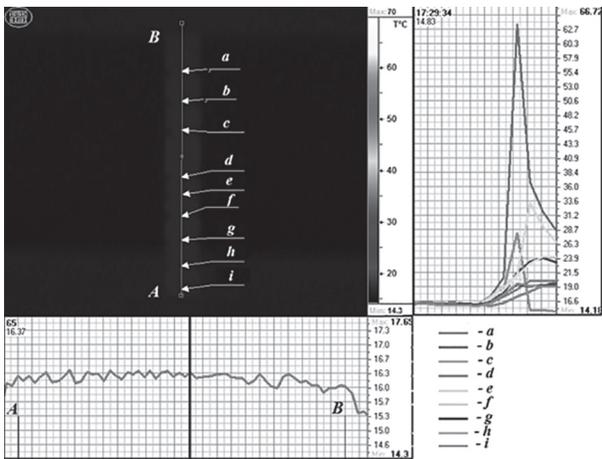


Рисунок 6 — Данные термографии образца «гг» в начальном кадре 1

у выточки работает в составе кольцевого ребра жесткости, ограничивающего свободное деформирование выточки, и сказывается на характеристиках пластичности стали.

Образцы типа «гг» деформировались при скорости движения траверсы 0,46 мм/с. Максимальная температура поверхности в зоне шейки достигла 64 °С (рисунок 6). Кольцевые ребра жесткости большой ширины при этом не нагревались, т. е. работали упруго. Во всех выточках развивались пластические деформации (рисунок 7 а и кадры 8–10 на рисунке 7 б). Значительный нагрев произошел в зоне узких ребер жесткости. Температура боковой поверхности ребер жесткости достигала 40 °С (при температуре поверхности выточки 64 °С). Изменение температуры поверхности ребер и выточек отчетливо прослеживается на графике кадров 8–10 (таблица 5). После разрыва образца тепло волной уходит в материал частей стержня (см. таблицу 5, кадр 10). Следует отметить, что в процессе деформирования образцов изменялась чернота поверхности

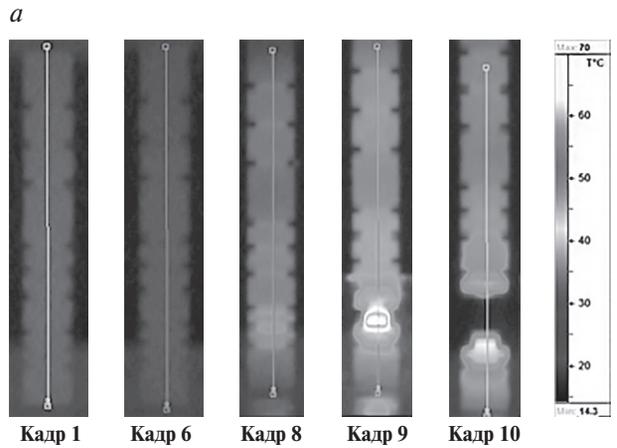
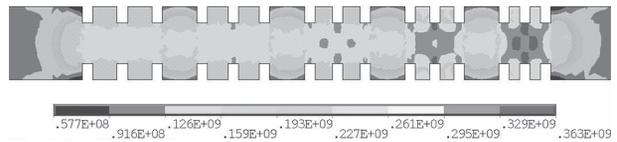
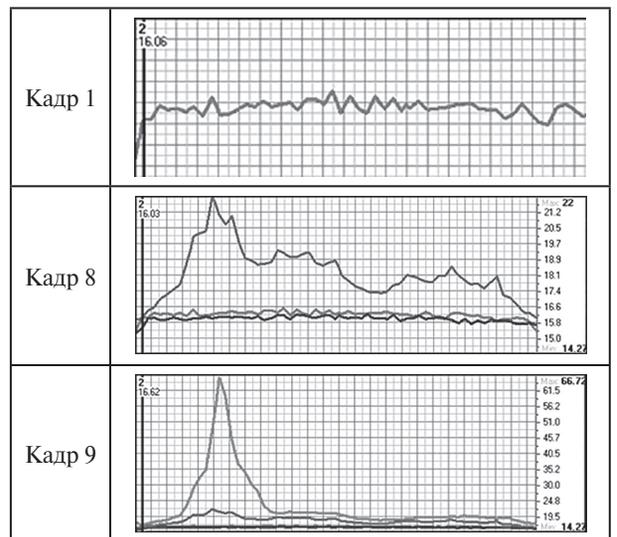


Рисунок 7 — Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в образце «гг» (а) и характерные кадры термофильма (б): 6-й кадр — конец упругой работы в выточке; 8-й кадр — начало пластике; 9-й кадр — развитие трещины в центральной части и «губок среза» по периметру; 10-й кадр — излом

Таблица 5 — Графики покадрового изменения температур вдоль оси АВ образца «гг»



образцов (рисунок 8). В момент излома произошло стряхивание сажи с поверхности образца.

Заключение. 1. В корне прямоугольных выточек исследованных стальных цилиндрических стержней круглого сечения, содержащих группы равно отдаленных между собой выточек с одинаковой геометрией, с увеличением расстояния между выточками относительное сужение в месте разрушения уменьшается в полтора и более раз при изменении отношения ширины выступов к ширине выточек от 1 до 4.

2. Установлено, что в цилиндрических стержнях из низкоуглеродистой стали с группами

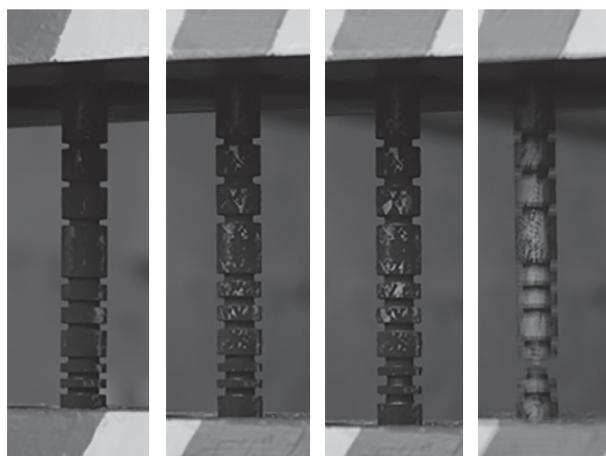


Рисунок 8 — Последовательное изменение черноты поверхности образца типа «gr» в процессе образования полос сдвига при растяжении

выточек и выступов по длине, находящихся под действием возрастающей квазистатической нагрузки, можно определять тепловым методом с вероятностью не ниже 95% возникновение зон предельных состояний, участков зарождения трещин и их развития в элементах.

Список литературы

1. Биргер, И.А. Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. — М.: Машиностроение, 1990. — 368 с.
2. Якушев, А.И. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений / А.И. Якушев, Р.Х. Мустаев, Р.Р. Мавлютов. — М.: Машиностроение, 1979. — 215 с.

3. Махутов, Н.А. Эффекты упругопластического деформирования и ползучести в резьбовых соединениях / Н.А. Махутов, В.В. Зацаринный // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2015. — Т. 81, № 9. — С.54–59.
4. Статическая, динамическая и циклическая прочность металла шпилек крупных гидроагрегатов / В.М. Матюнин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2015. — Т. 81, № 9. — С. 59–66.
5. Мойсейчик, Е.А. Предельное состояние шпилек крепления крышки турбины гидроагрегата и разработка системы мониторинга их работоспособности / Е.А. Мойсейчик // Гидротехническое строительство. — 2015. — № 3. — С. 43–47.
6. Потапов, В.Н. Оценка работоспособности болтов, работающих на растяжение в стальных конструкциях / В.Н. Потапов, Б.С. Мищик // Промышленное строительство. — 1982. — № 5. — С. 23–25.
7. Формирование оптимальной конструкционной прочности авиационных крепежных болтов из титановых сплавов / О.М. Ивасишин [и др.] // Металлофизика. Новейшие технол. — 2017. — Т. 39, № 9. — С. 1197–1211.
8. Fischer, F.L. Axial Tension Fatigue Strength of Anchor Bolts / L.F. Franklin, K.H. Frank // Research Study 3-5-75-172. 13. Type 0. Report and Period Covered. Interim. 14. Sponsoring Agency Code, March 1977. — 105 p.
9. Bickford, J.H. Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints / J.H. Bickford. — 4th ed. Non-Gasketed Joints. — London – New York: CRC Press, 2008. — 564 p.
10. Dowling, N.E. Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. — 4th ed. — London: Pearson Education Limited, 2013. — 977 p.
11. Пресняков, А.А. Взаимодействия в системе «образец — машина» при механических испытаниях / А.А. Пресняков. — Алма-Ата: Галым, 1991. — 121 с.
12. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. — М.: ИД Спектр, 2009. — 544 с.
13. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. — М.: Мир, 1975. — 934 с.

VASILEVICH Yurij V., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Head of the Department of Resistance of Materials of Machine-Building Profile¹

MOYSEYCHIK Evgenij A., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department of Information Technologies and Physics and Mathematics²

MOYSEYCHIK Alexander E.

Lecturer of the Department of Resistance of Materials of Machine-Building Profile¹

E-mail: alexmoyseychik@gmail.com

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Baranovich State University, Baranovich, Republic of Belarus

Received 19 January 2018.

DEFORMATION AND HEAT GENERATION IN CYLINDRICAL SAMPLES FROM LOW-CARBON STEEL WITH GROUP RECESS WHEN STRETCHED

The paper shows that in the root of rectangular grooves of stretched steel cylindrical rods of circular cross section containing groups of equally distant grooves with the same geometry, with an increase in the distance between the grooves, the relative narrowing at the point of fracture decreases by 1.5 or more times when the ratio of the width of the protrusions to the width of grooves changes from 1 to 4. It is obtained that at a constant deformation rate of a specific element the change in the temperature of its points will be proportional to the stresses acting in the elements NTE. It is established that in the cylindrical rods made of low-carbon steel with groups of grooves and protrusions along the length under the influence of an increasing load, the emergence of zones of limiting

states, fracture nucleation sites and their development in elements can be determined by the thermal method with a probability of not less than 95%.

Keywords: low-carbon steel, cylindrical samples, group grooves, deformation, heat generation

References

1. Birger I.A., Iosilevich G.B. *Rezbovye i flantsevye soedineniya* [Threaded and flanged connections]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 268 p.
2. Yakushev A.I., Mustaev R.Kh., Mavlyutov R.R. *Povyshenie prochnosti i nadezhnosti rezbovykh soedineniy* [Increasing the strength and reliability of threaded joints]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 215 p.
3. Makhutov N.A., Zatsarinnyy V.V. Effekty uprugoplasticheskogo deformirovaniya i polzuchesti v rezbovykh soedineniyakh [Effects of elastoplastic deformation and creep in threaded joints]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Diagnostics of materials], 2015, vol. 81, no. 9, pp. 54–59.
4. Matyunin V.M., Orakhelashvili B.M., Marchenkov A.Yu. Statische, dinamicheskiye i tsiklicheskiye prochnost metallakh shpilek krupnykh gidroagregatov [Static, dynamic and cyclic strength of the metal studs of large hydroelectric aggregates]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Diagnostics of materials], 2015, vol. 81, no. 9, pp. 59–66.
5. Moyseychik E.A. Predelnoe sostoyaniye shpilek turbiny gidroagregata i razrabotka sistemy monitoringa ikh rabotosposobnosti [Limiting state of the studs for securing the turbine cover of the hydroelectric unit and the development of a monitoring system for their operability]. *Gidrotekhnicheskoe oborudovanie* [Hydrotechnical construction], 2015, no. 3, pp. 43–47.
6. Potapov V.N., Mishchik B.S. Otsenka rabotosposobnosti boltov, rabotayushchikh na rastyazhenie v stalnykh konstruktsiyakh [Evaluation of the performance of bolts working on the tension in steel structures]. *Promyshlennoe stroitelstvo* [Industrial Construction], 1982, no. 5, pp. 23–25.
7. Ivasishin O.M., Markovskiy P.E., Meshkov Yu.Ya., Shiyaniy A.V. Formirovaniye optimalnoy konstruktsionnoy prochnosti aviatsionnykh krepzhykh boltov iz titanovykh splavov [Formation of optimum structural strength of aircraft fixing bolts from titanium alloys]. *Metallofizika. Noveyshie tekhnologii* [Metallophysics. Latest technologies], 2017, vol. 39, no. 9, pp. 1197–1211.
8. Fischer F.L., Frank K.H. *Axial Tension Fatigue Strength of Anchor Bolts*. Research Study no. 3-5-75-172. Austin, March 1977. 105 p.
9. Bickford J.H. *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. Fourth Edition. Non-Gasketed Joints*. Boca Raton, London, New York, CRC Press, 2008. 564 p.
10. Dowling N.E. *Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. Fourth Edition. London, Pearson Education Limited, 2013. 977 p.
11. Presnyakov A.A. *Vzaimodeystviya v sisteme "obrazets — mashina" pri mekhanicheskikh ispytaniyakh* [Interactions in the "sample — machine" system during mechanical testing]. Alma-Ata, Galym Publ., 1991. 121 p.
12. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol* [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, ID Spektr Publ., 2009. 544 p.
13. Ziegel R., Howell J. *Teploobmen izlucheniem* [Heat exchange by radiation]. Moscow, Mir Publ., 1975. 934 p.