

Определение предельной амплитуды цикла упрочненных деталей с концентраторами напряжений с сжимающими средними напряжениями

Шляпников П.А.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика

С.П. Королева, СГАУ, Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия

e-mail: pawel777000@yandex.ru

Статья поступила 20.09.2020

Аннотация

Для подтверждения полученного ранее теоретического решения о прогнозировании предельной амплитуды упрочненных методами поверхностного пластического деформирования (ППД) деталей с концентраторами напряжений при асимметрии цикла центрального растяжения-сжатия и сжимающих средних напряжений цикла было проведено экспериментальное исследование упрочненных пневмодробеструйной обработкой цилиндрических образцов из стали 45 с надрезами полукруглого профиля.

Полученные экспериментальные результаты показали хорошее совпадение с данными, полученными ранее расчетным путем. По результатам эксперимента предложено проводить оценку предельной амплитуды упрочненных деталей с концентраторами напряжений при центральном растяжении-сжатии в условиях асимметрии цикла со сжимающими средними напряжениями с помощью разработанной диаграммы предельных амплитуд цикла деталей с учетом

остаточных напряжений. Цель работы – разработать методику количественной оценки предельной амплитуды упрочнённых образцов с концентраторами напряжений при различных сжимающих средних напряжениях цикла.

Ключевые слова: остаточные напряжения, концентрация напряжений, сжимающие средние напряжения, диаграмма предельных амплитуд, асимметрия цикла, сопротивление усталости.

Введение

В современных условиях большое внимание уделяется прочности конструкций. В современном машиностроении конструкция деталей имеет, как правило, сложную форму. А сложные детали неизбежно имеют концентраторы напряжений, да к тому же, работают при знакопеременных нагрузках. В этом случае концентрация напряжений оказывает определяющее влияние на предел выносливости (предельную амплитуду), снижая срок службы детали.

Определение приращения предельной амплитуды (предела выносливости) детали с концентраторами после упрочняющей обработки важная научно-техническая задача, которая в настоящее время решается, в основном, экспериментально, то есть проводятся испытания на усталость таких деталей без упрочнения и после упрочняющей обработки [13, 16, 17]. Разность полученных в результате испытаний пределов выносливости дает экспериментально полученную величину предельной амплитуды (предела выносливости) упрочненной детали с концентраторами напряжений. Этот метод очень затратный, трудоёмкий,

длительный по времени. Поэтому перед инженерами и исследователями стоит задача создать механизмы, методики, позволяющие определять приращение предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений, по возможности без испытаний, или сведя эти испытания к минимуму.

Поставленная в настоящем исследовании цель совпадает с разработанным в авиационной отрасли Форсайтом развитием авиационной науки и технологий на период до 2030 г. Работы в этом направлении должны обеспечить «создание эффективных методов, алгоритмов и программ вычислительной прочности для многодисциплинарного анализа и оптимизации композиционных, металлических и комбинированных конструкций».

Одним из вопросов, представляющих практический интерес, является установление закономерностей и уточнение методик расчёта при асимметричном приложении нагрузки. Для случая растягивающих напряжений можно считать установленным, что с возрастанием величины среднего напряжения верхнее предельное (максимальное) напряжение цикла увеличивается, а величина амплитуды на пределе усталости (выносливости) уменьшается [5, 6, 8, 10]. Применительно к средним сжимающим напряжениям этот вопрос мало изучен.

К наиболее ранним работам по исследованию влияния средних сжимающих напряжений на предельную амплитуду принадлежат такие работы, в которых производились испытания на усталость при повторно-переменном растяжении и сжатии [7, 9, 11, 15]. Результаты, полученные для мягкой стали, указывают, что при начальных растягивающих напряжениях амплитуда напряжения цикла на пределе

усталости уменьшается. К сожалению, рассматривались, во-первых, гладкие лабораторные образцы.

Повышение предела усталости для вязких материалов объясняется тем, что вследствие объемного напряжённого состояния (всестороннего сжатия), увеличивается склонность материала к разрушению от действия нормальных растягивающих напряжений, которые уменьшаются посредством средних сжимающих напряжений [18, 19, 20].

Считается, что если в образце, имеющем круговой надрез, в вершине надреза создать остаточные сжимающие напряжения, то при этом должно произойти повышение предела выносливости. Данный вывод не противоречит современным представлениям о действии остаточных напряжений на предел выносливости образцов с надрезами. Но сказать что-либо более конкретное не представляется возможным, так как нет методики определения остаточных напряжений, хотя результирующая кривая распределения напряжений имеется [12, 14, 15].

В течение достаточного большого промежутка времени проблеме влияния сжимающих средних напряжений на предел выносливости при растяжении-сжатии не уделялось должного внимания. Литературные источники по данной теме в периодической технической литературе отсутствуют. Попытка дать количественную оценку сопротивления усталости при отрицательных значениях коэффициента асимметрии были предприняты в работе [1]. Данная статья посвящена изучению циклической долговечности при отрицательных значениях коэффициента

асимметрии стандартных корсетных образцов из стали 45. Работа относится к области исследования отличной от изложенной в настоящей статье.

На основании изложенного представляет практический интерес подтвердить экспериментально полученные ранее результаты компьютерного моделирования [2], разработать методику построения диаграммы предельных амплитуд цикла упрочнённой детали с концентраторами при центральном растяжении-сжатии в условиях асимметрии цикла с сжимающими средними напряжениями для получения расчётных зависимостей коэффициента влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду упрочненных образцов с концентраторами напряжений при различной степени асимметрии цикла.

Результаты

Чтобы оценить влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости, необходимо знать их величину и распределение по глубине поверхностного слоя в наиболее опасном сечении образца или детали.

Исследование влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости при растяжении-сжатии проводилось на цилиндрических образцах с надрезом полукруглого профиля радиусом $R = 0,3$ мм, изготовленных из стали 45 со следующими механическими характеристиками: предел прочности – $\sigma_b = 610$ МПа, предел текучести – $\sigma_T = 396$ МПа, относительное остаточное удлинение – $\delta = 24,2\%$, относительное остаточное сужение – $\psi = 51,8\%$, сопротивление отрыву – $S_k = 1010$ Мпа.

Изготовленные образцы делились на две партии, одна из которых подвергалась упрочнению стальными шариками на пневмодробеструйной установке. Режимы пневмодробеструйной обработки составляли: давление воздуха $\rho = 0,28$ МПа, диаметр шариков $d_{ш} = 1,5-2$ мм, время упрочнения $\tau = 8$, мин.

Надрезы полукруглого профиля на неупрочненные и упрочненные гладкие образцы наносились фасонным резцом.

В результате нанесения надреза на упрочненный образец в зоне концентратора происходило перераспределение остаточных напряжений гладкого образца и возникали дополнительные остаточные напряжения, которые определялись расчетным методом [3].

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах определялись методом колец и полосок [3].

Эпюры остаточных напряжений гладких цилиндрических образцов представлены на рис. 1, а. Можно видеть, что пневмодробеструйная обработка создаёт в поверхностном слое образцов значительные сжимающие остаточные напряжения с глубиной залегания 0,25 и 0,40 мм.

Остаточные напряжения в образцах с надрезом (рис. 1, б) определялись сложением остаточных напряжений гладкого образца и дополнительных остаточных напряжений, полученных расчетным путем.

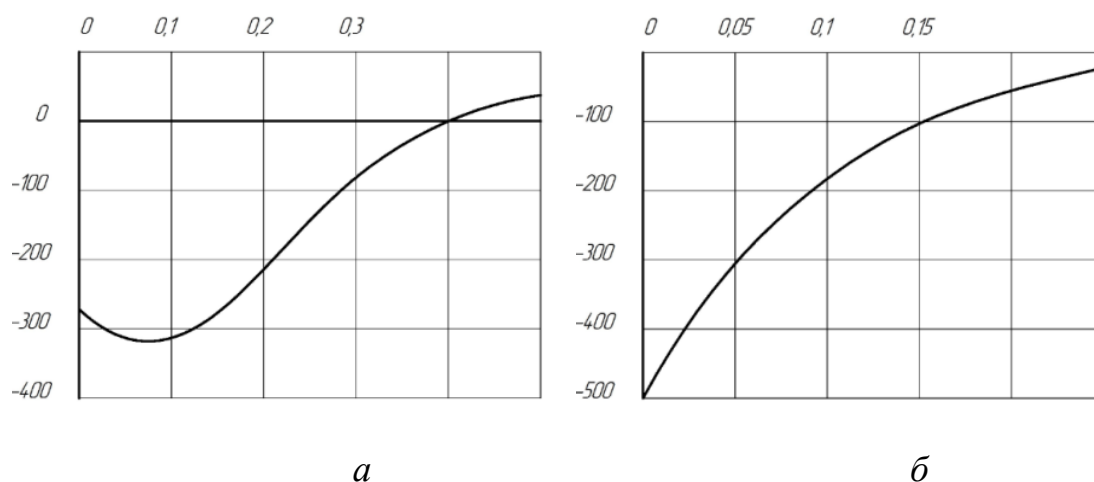


Рисунок. 1. Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) из стали 45 после пневмодробеструйной обработки

Исходя из приведённых на рис. 1, б данных видно, что сжимающие остаточные напряжения в образцах с надрезом имеют максимальные значения на поверхности концентратора, быстро уменьшаясь по толщине поверхностного слоя наименьшего сечения образца с надрезом. Остаточные напряжения, представленные на рис. 1, б использовались далее для оценки их влияния на предел выносливости при растяжении-сжатии в условиях концентрации напряжений.

Экспериментальное определение предельной амплитуды неупрочненных и упрочненных образцов проводили на испытательной машине УММ-01, в конструкции которой имеется возможность реализации как растягивающих, так и сжимающих средних напряжений цикла.

Предел выносливости детали с остаточными напряжениями при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ определяли по формуле [3]

$$\sigma_R = \sigma_R^0 - \bar{\psi}_\delta |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (1)$$

где σ_R^0 – предел выносливости неупрочнённой детали, $\bar{\sigma}_{ocm}$ – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению. Критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ вычисляли по следующей зависимости:

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{ocm}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad 2)$$

где $\sigma_{ocm}(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении образца или детали; $\xi = Y/t_{кр} = \cos \nu$ – расстояние от дна впадины детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$, $t_{кр}$ – максимально возможная (критическая) глубина нераспространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе детали на пределе выносливости

Результаты определения предела выносливости представлены в таблице 1. Для сравнения в таблице приведены расчетные данные, полученные ранее [2] компьютерным моделированием. В таблице также приведены значения критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$, критической глубины неразрушающей трещины усталости $t_{кр}$, обнаруженной в исследуемых образцах при напряжениях близких к пределу выносливости.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Среднее напряжение цикла σ_m , МПа	Неупрочненный образец σ_{Ra} , МПа		Упрочненный образец σ_{Ra} , МПа				
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	$\bar{\sigma}_{ост}$	$t_{кр}$	$\bar{\psi}_\sigma$	Расчет
0	152	150	200	-134	0,20 6	0,35 5	210
-50	-136	149	-197	-134	0,20 6	0,45 2	192
-100	-134	154	-177	-134	0,20 5	0,31 8	184
-200	-133	130	-156	-134	0,20 7	0,17 0	173

Оценку предельной амплитуды упрочнённых образцов и деталей с различной степенью асимметрии цикла предложено проводить с помощью диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений деталей с учётом остаточных напряжений. В основу диаграммы предельных амплитуд цикла положена видоизменённая диаграмма Ганна [3]:

В осях $\sigma_m - \sigma_a$ (рис. 2), прежде всего, строится диаграмма предельных амплитуд цикла для материала образца. По оси σ_a откладывается предел выносливости материала при симметричном цикле в случае растяжения-сжатия $OA = \sigma_{-1p}$, по оси σ_m – сопротивление отрыву материала $OB = S_k$. Ограничивая работу материала по текучести, по оси абсцисс откладывается предел текучести $OD = \sigma_T$ и проводится прямая DC под углом 45° к оси абсцисс. Тогда ACD – диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений для материала образца или детали, учитывающая как усталость, так и текучесть.

Затем строится диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений для образца или детали с концентратором напряжений, изготовленных без остаточных напряжений. Наличие концентратора уменьшает предел выносливости материала при симметричном цикле $\sigma_{-1\rho}$ в k_σ раз, где k_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений. При этом считается, что шероховатость поверхности и размеры поперечного сечения образца или детали такие же, как и образца, на котором определяли $\sigma_{-1\rho}$, и, кроме того, эффективный коэффициент концентрации не зависит от асимметрии цикла. По оси ординат откладывается $OA_I = \sigma_{-1\rho} / k_\sigma$ и из точки A_I проводится прямая $A_I C_I$ параллельно AB до пересечения с прямой $D_I C_I$, ограничивающей работу образца по текучести. Здесь $OD_I = \sigma_T / \alpha_\sigma$, где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений. На рис. 2 точками обозначены результаты экспериментального определения предельной амплитуды неупрочнённых и упрочнённых образцов.

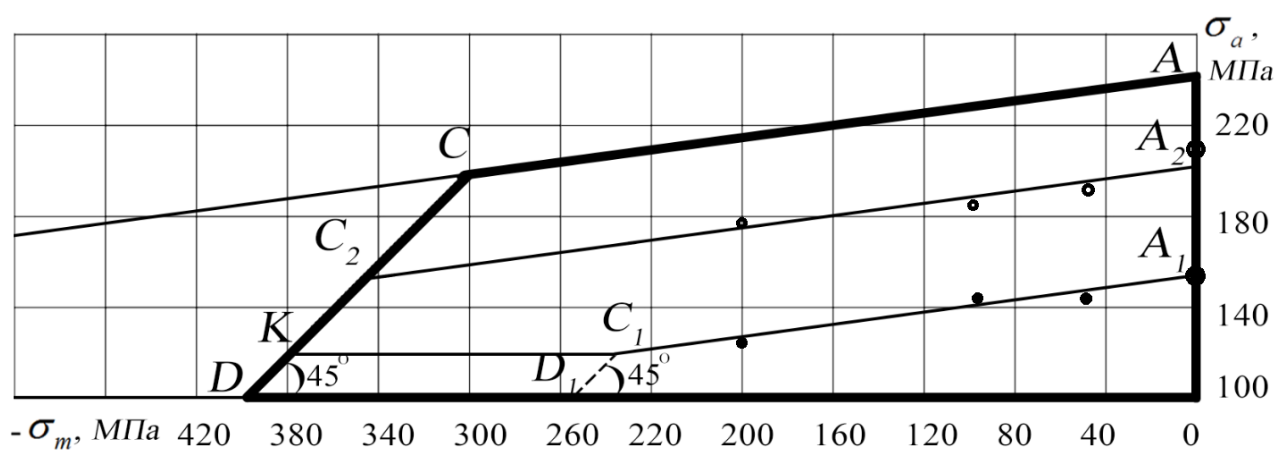


Рисунок 2. Диаграмма предельных амплитуд цикла со средними сжимающими напряжениями при асимметричном цикле, ● – упрочнённый образец с концентратором, ● – неупрочнённый образец с концентратором напряжений

Для прямых A_1C_1 и D_1C_1 можно записать уравнения через известные механические характеристики материала в виде (3) и (4):

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1\rho}} K_\sigma + \frac{\sigma_m}{S_k} K_\sigma = 1, \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_T} \alpha_\sigma + \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \alpha_\sigma = 1. \quad (4)$$

Точка C_1 характеризует начало локальной текучести в наиболее нагруженном сечении образца или детали, то есть в области дна впадины концентратора. Решая совместно (3) и (4), можно определить среднее напряжение σ_m^T , при котором начинается локальная текучесть (5):

$$\sigma_m^T = \frac{S_k \left(\sigma_T - \sigma_{-1} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} \right)}{\alpha_\sigma (S_k - \sigma_{-1\rho})}. \quad (5)$$

До тех пор, пока напряжения на дне концентратора не достигнут предела текучести материала σ_T по всему опасному сечению детали (рис. 2, точка K), предельная амплитуда σ_{R_a} не будет зависеть от среднего напряжения σ_m , поэтому диаграмма предельных амплитуд цикла детали без остаточных напряжений опишется ломаной A_1C_1KD .

Далее строится диаграмма предельных амплитуд цикла напряжения для детали с остаточными напряжениями, действующими в её опасном сечении. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости детали отождествляется с влиянием средних напряжений цикла [3]. Тогда для учёта действия сжимающих остаточных напряжений, увеличивающих предельную

амплитуду, левую часть диаграммы A_1C_1 следует перемещать параллельно вверх до положения A_2C_2 , а для учёта действия растягивающих остаточных напряжений – вниз до положения A_3C_3 . Следовательно, для детали со сжимающими остаточными напряжениями диаграмма предельных амплитуд цикла будет представлена ломаной A_2C_2KD с растягивающими – ломаной A_3C_3KD .

Для построения диаграммы предельных амплитуд цикла образца с учётом остаточных напряжений необходимо решить вопрос о том, на какую величину следует переместить прямую A_1C_1 . Простой перенос точки C_1 по оси абсцисс на величину максимальных остаточных напряжений неправомерен, так как не учитывает характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя концентратора и масштабный фактор. Поэтому предлагается перемещать точку A_1 по оси ординат на величину приращения предела выносливости детали с концентратором при симметричном цикле A_1A_2 (A_1A_3) = $\Delta\sigma_{-1\rho}$, используя критерий остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ [4].

Приращение предельной амплитуды детали $\Delta\sigma_{R\alpha}$ за счёт остаточных напряжений во впадинах концентратора при любом среднем напряжении σ_m определяется выражением (6):

$$\Delta\sigma_{R\alpha} = \bar{\psi}_{\sigma}^{(m)} \bar{\sigma}_{ocm}, \quad (6)$$

где: $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду при среднем напряжении σ_m .

Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ при $\sigma_m > \sigma_m^T$ можно вычислить по формуле (7):

$$\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)} = \bar{\psi}_{\sigma} - \frac{\sigma_{-1\rho}(\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k |\bar{\sigma}_{ocm}|}, \quad (7)$$

где:

Формула получена из геометрических соображений с использованием данных рис. 2. При $\sigma_m > \sigma_m^T$ коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ необходимо положить равным $\bar{\psi}_{\sigma}$, что следует из диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений детали без остаточных и с остаточными напряжениями (рис. 2).

Заключение

Проведено экспериментальное исследование влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости при центральном растяжении-сжатии с различными сжимающими средними напряжениями цикла цилиндрических образцов из стали 45 с надрезом полукруглого профиля радиусом $R = 0,3$ мм. По результатам испытаний построена диаграмма предельных амплитуд цикла упрочненных образцов с концентраторами напряжений. В основу диаграммы предельных амплитуд цикла положена видоизменённая диаграмма Ганна. Из геометрических соображений получена формула для коэффициента влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду при различных сжимающих напряжениях цикла растяжения-сжатия.

Результаты: Предложена методика оценки предельной амплитуды упрочнённых образцов и деталей с использованием диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений деталей с учётом остаточных напряжений. Предложена простая формула расчета предельной амплитуды упрочненных деталей с

концентраторами при различной степени асимметрии цикла. Полученные научные результаты можно использовать в расчетах на прочность без проведения длительных и затратных испытаний.

Библиографический список

1. Мешков Ю.А., Шиян А.В. Оценка конструкционного качества сталей по их способности оказывать сопротивление хрупкому разрушению в условиях концентрации напряжений // Механика машин, механизмов и материалов. 2015. № 3. С. 59 – 63.
2. Никитин И.С., Бураго Н.Г., Никитин А.Д., Якушев В.Л. Определение критической плоскости и оценка усталостной долговечности при различных режимах циклического нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 4. С. 238 – 252.
3. Добровольский Д.С. Напряжения и упругопластические деформации стержней с кольцевыми трещинами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 9. С. 65 – 69.
4. Костичев В.Э. Применение динамического моделирования для оценки влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). 2015. № 1 (14). Ч. 1. С. 147 – 153.

5. Фирсанов В.В., Во А.Х., Чан Н.Д. Исследование напряженного состояния подкрепленных оболочек по уточненной теории с учетом влияния упругости ребер и заземленного края // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102130>
6. Шакиртов М.М. О влиянии коэффициента асимметрии цикла внешней нагрузки на характеристики цикла нагружения материала при вершине трещиновидного дефекта // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72589>
7. Вакулюк В.С., Шадрин В.К., Лунин В.В., Киселев П.Е., Шляпников П.А. Влияние толщины упрочнённого слоя на предел выносливости при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 6. С. 108 - 111.
8. Коровайцева Е.А. Систематизация одномерных краевых задач механики деформируемого твердого тела // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=112827>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-10)
9. Полоник Е.Н., Суренский Е.А., Федотов А.А. Автоматизация расчетов усталостной долговечности механических соединений элементов авиаконструкций // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76755>
10. Яшкова С.С. Лазерное поверхностное упрочнение // Молодой ученый. 2017. № 1. С. 99 - 101.
11. Зоан К.Х., Фирсанов В.В. Краевое напряженное состояние прямоугольной пластины переменной толщины на основе уточненной теории // Труды МАИ. 2020.

№110. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=112851>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-10)

12. Юдин Д.А., Фирсанов В.В. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов конструкции изделия при ударе о твердую преграду // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116343>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-8](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-8)

13. Андрюкова Е.А. Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции. – М.: Из-во Юрайт, 2018. – 247 с.

14. Пхон Х.К., Сысоев Е.О., Кузнецов Е.А., Мин К.Х. Прогнозирования долговечности работы трубопроводов высокого давления при воздействии малоцикловых нагрузок // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109237>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-2](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-2)

15. Трунин А.В. Повышение эффективности технологии упрочнения валов поверхностным пластическим деформированием путем создания в них заданной системы остаточных напряжений: Автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: 2015. – 19 с.

16. Лесота А.В., Рубаник В.В.мл., Рубаник В.В. Актуальные проблемы прочности: монография. – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2018. С. 373 – 384.

17. Багмутов В.П., Водопьянов В.И., Кондратьев О.В., Бадиков К.А. Усталостная прочность при отрицательных значениях коэффициента симметрии стали 45 и

титанового сплава ПТ-3В // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 5 (160). С. 69 – 73.

18. Кирпичев В.А., Костичев В.Э., Шляпников П.А. Прогнозирование предельной амплитуды образцов с концентраторами напряжений в условиях асимметрии цикла со сжимающими средними напряжениями // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 1. С. 136 - 140.

19. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичев В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей: монография. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. – 170 с.

20. Кирпичев В.А., Филатов А.П., Михалкина С.А., Шляпников П.А. Оценка влияния асимметрии цикла на предельную амплитуду поверхностно упрочнённых деталей //

Труды десятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 25-27 мая 2016г.): сборник трудов. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2016. Т. 1. С. 113 - 115.

Determining limiting amplitude of hardened parts cycle with stress concentrators with compressing average stresses

Shlyapnikov P.A.

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,

34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia

e-mail: pawel777000@yandex.ru

Abstract

The purpose of this work consists in developing a technique for the limiting amplitude quantifying of hardened samples with stress concentrators at various compressive average cycle stresses.

To confirm the previously obtained theoretical solution on predicting the maximum amplitude of parts with stress concentrators, hardened by the surface plastic deformation (PPD) methods at the central tension-compression cycle asymmetry and compressive average stresses of the cycle, an experimental study of cylindrical samples made of 45 steel with semicircular profile incisions hardened by pneumatic blasting was performed.

Both non-hardened and hardened cylindrical samples with concentrators applied to them in the form of an annular incision of a semicircular profile were subjected to studying. Incisions were being applied on the hardened sample after pneumatic blasting of a smooth cylindrical sample. As the result, the increment of the maximum amplitude of samples with stress concentrators due to surface hardening, as well as the redistribution of residual stresses of a hardened smooth sample as a result of applying the concentrator to the hardened surface of the sample were being determined.

Experimental limit amplitude determining of non-strengthened and hardened samples was performed with the UMM-01 testing machine, allowing implementing both tensile and compressive average cycle stresses. The results of the endurance limit determining are summarized in a table. For comparison, the table shows the calculated data obtained earlier by the computer modeling.

The author proposes to perform estimation of the hardened samples and parts with different asymmetry degree by the cycle limiting amplitudes diagrams with account for residual stresses. The limiting amplitudes diagram is based the modified Gann diagram.

A limiting amplitudes diagram of a cycle with average compressive stresses was obtained for an asymmetric cycle, where a hardened sample with a concentrator and a non-hardened sample with a stress concentrator were employed.

From geometrical considerations, the equation for the coefficient of of residual stresses effect on the limiting amplitude at various compressive stresses of the stretch-compression cycle was obtained. As the result, a technique for the limit amplitude of hardened samples and parts estimating employing the limit amplitudes diagram of the stress cycle of parts, with account for residual stresses was proposed. A simple equation for calculating maximum amplitude of hardened parts with concentrators at different degrees of cycle asymmetry was proposed. The obtained scientific results can be used in strength calculations without lengthy and costly tests.

Keywords: residual stresses, stresses concentration, compressive average stresses, limiting amplitudes diagram, cycle asymmetry, fatigue resistance.

References

1. Meshkov Yu.A., Shiyan A.V. Meshkov Yu.A., Shiyan A.V. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2015, no. 3, pp. 59 – 63.
2. Nikitin I.S., Burago N.G., Nikitin A.D., Yakushev V.L. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2017, no. 4, pp. 238 – 252.
3. Dobrovol'skii D.S. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, vol. 82, no. 9, pp. 65 – 69.
4. Kostichev V.E. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2015, no. 1 (14), Ch. 1, pp. 147 – 153.
5. Firsanov V.V., Vo A.Kh., Chan N.D. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102130>
6. Shakirtov M.M. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=72589>
7. Vakulyuk V.S., Shadrin V.K., Lunin V.V., Kiselev P.E., Shlyapnikov P.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2015, no. 6, pp. 108 - 111.
8. Korovaitseva E.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 110. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=112827>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-10)
9. Polonik E.N., Surenskii E.A., Fedotov A.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=76755>
10. Yashkova S.S. *Molodoi uchenyi*, 2017, no. 1, pp. 99 - 101.

11. Zoan K.Kh., Firsanov V.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 110. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=112851>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-10)
12. Yudin D.A., Firsanov V.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116343>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-8](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-8)
13. Andryukova E.A. *Metallurgiya. Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii* (Metallurgy. Residual stresses in metal products. Study guide for universities), Moscow, Iz-vo Yurait, 2018, 247 p.
14. Pkhon Kh.K., Sysoev E.O., Kuznetsov E.A., Min K.Kh. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109237> . DOI: [10.34759/trd-2019-108-2](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-2)
15. Trunin A.V. *Povyshenie effektivnosti tekhnologii uprochneniya valov poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem putem sozdaniya v nikh zadannoi sistemy ostatochnykh napryazhenii* (Efficiency improving of shaft hardening technology by surface plastic deformation by creating a specified system of residual stresses in them). Abstract of doctor's thesis, Moscow, 2015, 19 p.
16. Lesota A.V., Rubanik V.V., Rubanik V.V. *Aktual'nye problemy prochnosti* (Up-to-date problems of strength), Vitebsk, Vitebskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2018, pp. 373 – 384.
17. Bagmutov V.P., Vodop'yanov V.I., Kondrat'ev O.V., Badikov K.A. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 5 (160), pp. 69 – 73.
18. Kirpichev V.A., Kostichev V.E., Shlyapnikov P.A. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2020, no. 1, pp. 136 - 140.

19. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Minin B.V., Kirpichev V.A., Kocherov E.P., Golovkin V.V. *Ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti vysokoprochnykh rez'bovykh detalei* (Residual stresses and fatigue resistance of high-strength threaded parts), Samara, Izd-vo SamNTs RAN, 2015, 170 p.
20. Kirpichev V.A., Filatov A.P., Mikhalkina S.A., Shlyapnikov P.A. *Trudy desyatoi Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi"*: sbornik trudov, Samara: Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016, vol. 1, pp. 113 - 115.