

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РОСТА АСИММЕТРИИ ЦИКЛА
И ПЕРЕГРУЗОК НА НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ
В ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ

С.В. Белодеденко, Г.Н. Биличенко, В.А. Ермократьев

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE INCREASE
IN THE CYCLE ASYMMETRY AND OVERLOADS ON DAMAGE
ACCUMULATION IN A HIGH-STRENGTH STEEL

S.V. Belodedenko, G.N. Bilichenko, V.A. Ermokrattev

Национальная металлургическая академия Украины

Abstract. The behavior regularities of function, which is intended for updating magnitude of cumulative fatigue damages under overloading, are considered. The quantitative evaluation of effect on the durability of main and overloading step cycle asymmetry is carried out. The programmable test results of the cylindrical alloy steel specimens with different stress-ratio are used. The nature of increase in durability under switch-over from programmable to random change of loading cycle characteristics is established.

Проблема оценки ресурса при нестационарном нагружении традиционно решается путем обоснования соответствующего закона суммирования повреждений. Для этого используются два подхода: 1) нахождение меры повреждений, которые складываются линейно (пропорционально), а их сумма при предельном состоянии равняется единице; 2) применение как меры повреждений относительных долговечностей, которые складываются якобы линейно, а их сумма a_0 (накопленное повреждение) отличается от единицы. Второй подход получил распространение при кинетических моделях оценки ресурса. В этой связи представление нагруженности в виде случайного процесса, наличие соответствующей ему кривой случайной усталости в значительной мере снижают остроту проблемы суммирования повреждений, поскольку используется линейное правило. Отклонения от этого правила наблюдается для режимов, в которых с некоторым периодом происходят выбросы нагрузок за границы основного процесса (перегрузки).

Основной признак перегрузки связан с ее частотой появления, а уже как следствие – это высокий уровень нагрузки. Нагрузки с относительной длительностью действия $c < 0,03$ некоторые нормативные документы разрешают не учитывать, считая $a_0 = 1$, что неверно с точки зрения точности прогнозирования. С другой стороны, перегрузки ведут к блокам нагружения малой полноты, для которых общеприменяемые способы корректировки дают неестественно низкие величины a_0 . Разрешение такого противоречия эффективно, когда закон суммирования как один из элементов оценки ресурса устанавливается в комплексе с другими операциями: схематизацией нагружения,

моделированием сопротивления усталости, поиском функции распределения долговечностей.

Для процессов нагружения с перегрузками разработана комплексная методика оценки гарантированного ресурса, в которой используется способ корректировки накопленного повреждения с помощью полиномиальных моделей [1,2]. Техника их экспериментального определения основана на программных испытаниях двухступенчатыми блоками с варьируемыми параметрами [3]. Стремление к универсализации модели (распространение ее на различные материалы и виды НДС) заставило выразить нагруженность ступеней непосредственно в элементарных (за цикл) повреждениях [4]. При этом было установлено, что асимметрия цикла нагружения в знакопеременной области оказывает влияние не величину a_0 .

Распространение высокопрочных сталей при изготовлении деталей машин дало возможность увеличить на них статические нагрузки, будь-то от силы тяжести или от усилия затяжки и т.п. Это ведет к тому, что детали начинают работать при высоких коэффициентах асимметрии цикла R . Поэтому для высокопрочных сталей актуальны исследования сопротивления усталости в условиях, когда $R \rightarrow 0,6$ и выше.

При упругопластических перегрузках в зонах локализации деформаций появляются остаточные напряжения, изменяющие асимметрию цикла основного процесса. Следовательно, практический интерес представляет оценка влияния среднего напряжения цикла на накопление повреждений. Целью настоящих исследований являлось получение количественной модели корректировки накопления повреждений при перегрузках в условиях изменения величины R в знакопостоянной области. Данные исследования целесообразно осуществлять на примере высокопрочных сталей.

Объект и методика исследований. Гладкие образцы диаметром 9 мм изготавливались из 80-миллиметрового прутка стали 09Х16Н4Б ($\sigma_s = 1147 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 935 \text{ МПа}$, $\psi = 0,53$). Предварительно было детально исследовано сопротивление усталости этой стали в широком диапазоне асимметрии цикла и амплитуд напряжений. Получены уравнения долговечности, объединяющие уравнения кривых усталости и предельных амплитуд [5]. Поэтому возможно построение кривых усталости с любой асимметрией цикла при стационарном режиме (рис.1). Испытания на растяжение-сжатие при знакопостоянных режимах проводилась на машине ЭУС-20,а при знакопеременных – на машине УРС-50/50 с использованием программатора. Двухступенчатые блок-программы включали нагрузку основного фона с напряжением σ_ϕ и числом циклов n_ϕ и перегрузочную ступень с аналогичными параметрами σ_n и n_n . Частота перегрузки определялась соотношением $n_n / n_\phi = 0,002 - 0,004$, а объем блока выбирался так, чтобы число блоков до разрушения составляло $\lambda = 10 - 20$ (рис.2).

Показателем нагруженности ступени выступает элементарное повреждение, которое обратнопропорционально долговечности ступени: X_1 – для основного процесса и $d_n = 1 / N_n$ - для перегрузки. Величина a_0 зависит от абсолютных значений показателей нагруженности ступеней, а также от их соотношения. Чтобы сократить число факторов влияния, величина повреждения основной ступени выражается относительно к 10^7 циклам. Первый фактор – относительная величина перегрузки задан в виде $X_1 = \lg(d_n / d_\phi)$. Аналогично выражен второй фактор $X_2 = \lg(d_\phi \cdot 10^7)$.

Третьим и четвертым фактором являлись коэффициенты асимметрии перегрузочной R_n и основной R_ϕ ступеней. Получить искомую полиномиальную модель второго порядка можно на основании четырехфакторного эксперимента. Однако, вследствие узкого интервала возможных для реализации повреждений d_i при

высоких значениях R спланировать такой эксперимент сложно. Поэтому для оценки влияния факторов X_1 и X_2 использован хорошо апробированный центральный некомпозиционный план, в результате чего определена базовая модель $a_0(X_1, X_2)$ для $R_n = R_\phi = 0,2$.

Предполагая линейность влияния факторов R_ϕ и R_n , после опытов на двух уровнях факторов X_1 и X_2 , варьируя поочередно R_n и R_ϕ , получают зависимость $a_0(R_n, R_\phi)$. Тогда полная функция корректировки будет $a_o = a_o(X_1, X_2) + a_o(R_n, R_\phi)$.

В методологии оценка ресурса при схематизации нагружения в виде основного процесса с выбросами фактор случайности нагрузок учитывается величиной межблочного повреждения a_r , который устанавливается испытаниями при блок-случайном нагружении [4]:

$$a_r = \sum (a_{ni} / a_{oi}),$$

где a_{ni} – номинальное повреждение в i -ом блоке от нагрузок разного уровня,

a_{oi} – скорректированная величина накопленного повреждения в i -ом блоке (внутриблочное повреждение).

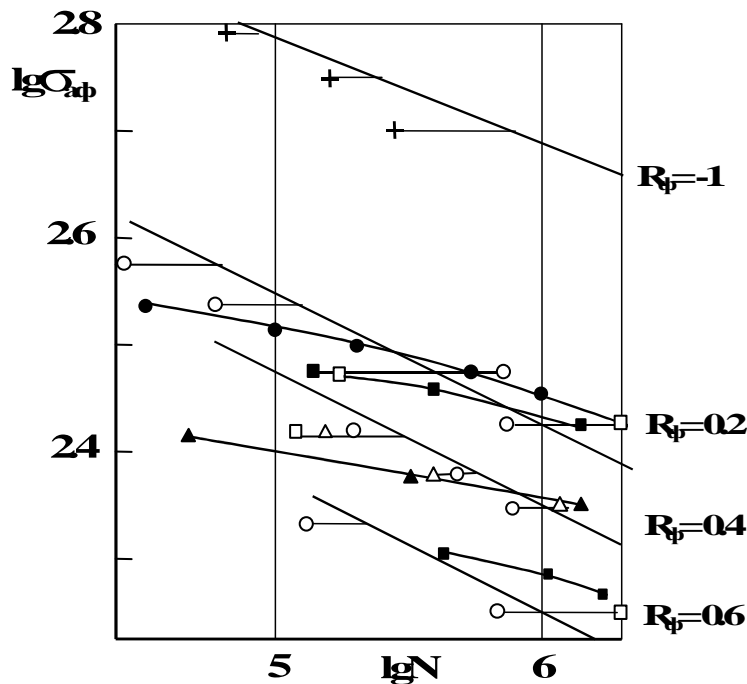


Рис. 1. Кривые усталости при стационарном (—) нагружении и результаты испытания при нагружении с перегрузками до напряжений $\sigma_{n\max} = 700 - 800 \text{ МПа}$ ($R_n = -1$) и $\bar{d}_n^{-1} = 5,6 \cdot 10^4$ ($R_n > 0,2$) при $R_n = -1(+)$; 0,2 (o); 0,4(Δ); 0,6 (□) (горизонтальными линиями указана величина R_ϕ), а также расчетные кривые усталости при программном нагружении с перегрузками при $R_n = 0,2$ (●); 0,4 (▲); 0,6 (■), показанные для амплитудного напряжения основного процесса $\sigma_{аф}$ в МПа.

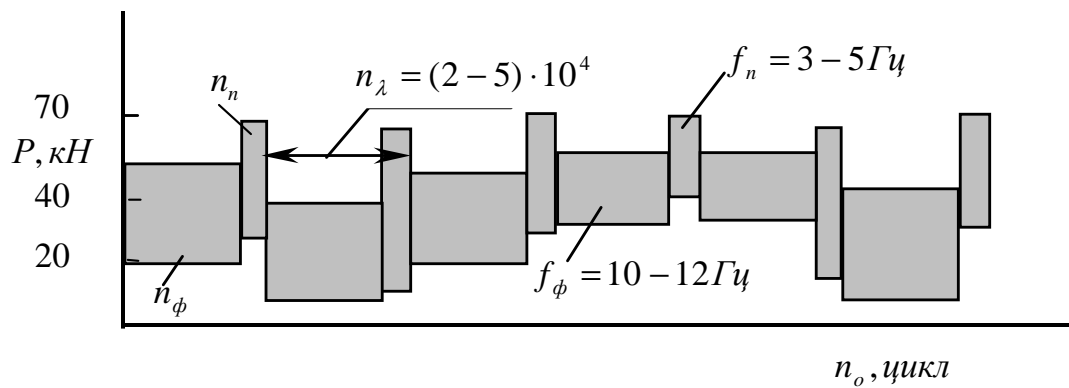


Рис. 2. Фрагмент блок-случайного процесса с изменяющейся асимметрией цикла, используемый для испытаний образцов.

Обработка и обсуждение результатов исследований. В эксперименте запланированы экстремальные нагрузки вплоть до $\sigma_{\max} = 1100 \text{ МПа}$. Поэтому необходимо изучить поведение стали 09Х16Н4Б при малоцикловом нагружении. Данный материал является циклически упрочняющимся – предел пропорциональности возрастает от 900-935 МПа до максимального напряжения перегрузки. Получается, что в большинстве опытов деформирование носило упругий характер, а разрушение обычно происходило на основной ступени. Но в целом, при экстремальных нагрузках поведение гладких образцов могло осуществляться по двум сценариям: при низкой частоте (повторная статика), когда пластические деформации развиваются во времени, разрушение происходит за 5-8 циклов; при частоте испытаний происходит указанное упрочнение и разрушение происходит с образованием трещины.

Статические испытания образцов после программного нагружения, в процессе чего накопивших 50-70% усталостного повреждения, показали, что диаграмма деформирования не имела участка упрочнения, условный предел текучести соответствовал пределу прочности, который не уменьшался по сравнению с исходным. Подобные диаграммы характерны для материалов, содержащих трещину, но в данной ситуации изломы имели чашечную форму, коэффициент удельного сужения не снижается относительно исходного.

При таких диаграммах деформирования полученные после разрушения в процессе циклических испытаний по размерам трещин в изломе критические КИН K_{fc} соответствовали положениям линейной механики разрушения. Форма трещин приближена к полукруглой. Приведенные на рис. 3 значения K_{fc} получены для различных режимов нагружения, в том числе и для стационарного. Не обнаружено влияния типа режима на величину K_{fc} , но наблюдается ее устойчивое снижение с ростом асимметрии цикла в момент разрушения.

По результатам базового эксперимента (табл.), где в каждом опыте было испытано по три образца, сформирована модель в виде:

$$a_0(X_1, X_2) = \hat{a}_0 = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_2 \cdot X_2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (1)$$

для которой коэффициенты b приведены в кодированной форме (предпоследний столбец) и натуральной (последний столбец). Сравнение экспериментальных величин \bar{a}_0 с расчетными и \hat{a}_0 указывает на приемлемую точность модели.

Таблица

Условия, результаты эксперимента и его обработка для программного нагружения
при $R_n = R_\phi = 0,2$

№ опыта	Факторы				\bar{a}_0	\hat{a}_0	Коэффициенты		
	X_1	X_2	$\lg(d_n / d_\phi)$	$\lg(d_\phi \cdot 10^7)$			b_0	b_{11}	b_{12}
1	-1	0	0,4	1,5	2,35	2,43	b_0	1,05	2,6
2	+1	0	1,6	1,5	2,07	1,99	b_1	-0,22	-8,2
3	+0,5	+0,87	1,3	1,0	1,10	1,18	b_{11}	1,16	3,2
4	+0,5	-0,87	1,3	2,0	0,30	0,37	b_2	0,62	4,2
5	-0,5	+0,87	0,7	1,0	1,75	1,68	b_{22}	-0,60	-1,8
6	-0,5	-0,87	0,7	2,0	0,40	0,32	b_{12}	-0,32	0,9
7	0	0	1,0	1,5	1,05	1,05	-	-	-

Полукруглая

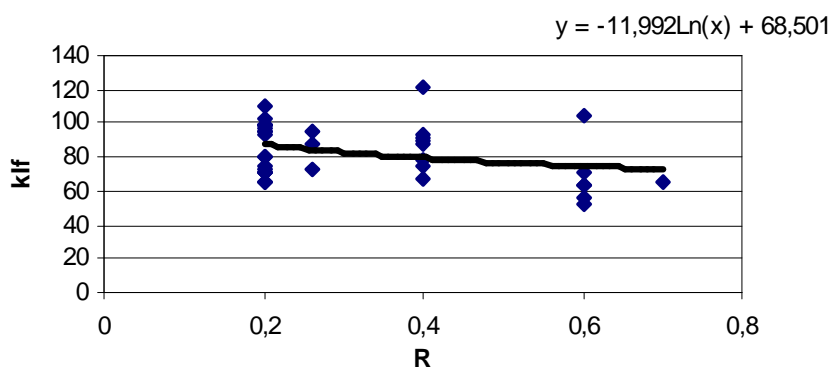


Рис. 3. Зависимость критического циклического КИН в $МПа \cdot \sqrt{м}$ от коэффициента асимметрии цикла.

Для образцов стали 09Х16Н4Б, испытанных в знакопостоянной области, сохраняется, установленная для знакопеременных режимов тенденция роста величины a_0 с ростом асимметрии цикла. Но имеется существенная разница в ходе кривых программной усталости: при знакопеременных режимах их наклон увеличивается относительно кривых стационарной усталости, а при знакопостоянных режимах, наоборот, уменьшается (рис.1).

Вне плана эксперимента были проведены испытания при фиксированном максимальном напряжении цикла $\sigma_n = 1085 МПа$ с асимметрией цикла $R_n = 0,2$ и $0,6$. При этом параметры основной ступени варьировались. Сравнение долговечностей для пяти режимов, где факторы X_1 , X_2 и R_n совпадали, а фактор асимметрии цикла основной ступени R_ϕ изменялся, дало основание предполагать незначимость последнего (рис. 1). Это упрощает вид модели корректировки повреждения.

Степень влияния фактора R_n производится по величинам a_0 , найденным для режимов с постоянными параметрами основной ступени и варьируемыми параметрами перегрузки посредством коэффициентов b_3 и b_{23} (рис. 4). Для факторов выраженных в кодированной форме, получены $b_3 = -0,9$, $b_{23} = 1,2$. Их величина указывает, что фактор асимметрии цикла перегрузок становится самым значимым в знакопостоянной области, превосходя факторы размера ступеней. Это объясняется особенностями трактовки нагруженности посредством повреждений. Вследствие этого модель становится более

устойчивой, а значит, универсальнее. Но также становится завуалированным фактор максимальных напряжений, которые возрастают вместе с величиной R_n , изменяя свойства материала. Таким образом, асимметрия цикла перегрузок, в сущности, отражает влияния максимальных напряжений.

Итак,

$$a_0(R_n, R_\phi) = b_3 + b_{23} \cdot X_2 + b_3 \cdot R_n + b_{23} \cdot X_2 \cdot R_n. \quad (2)$$

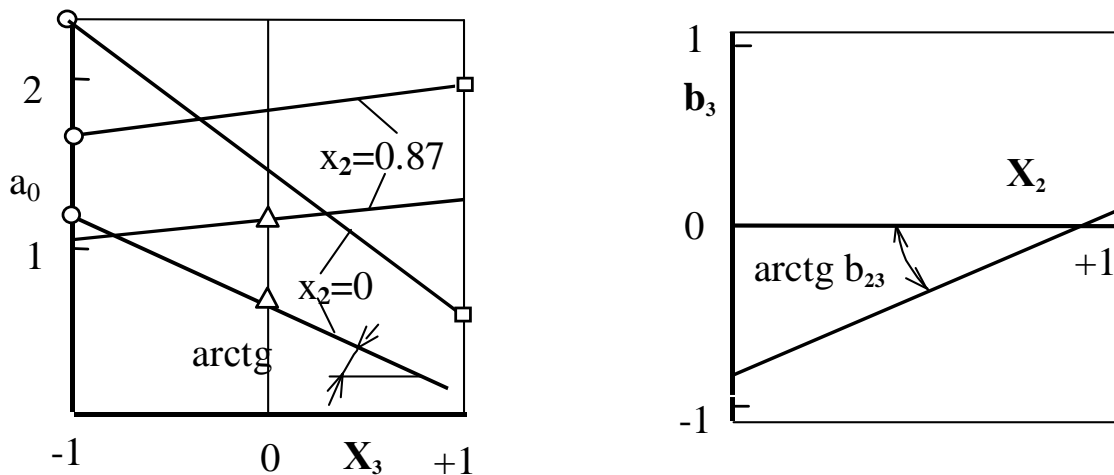


Рис. 4. Схемы к оценке влияния фактора асимметрии цикла перегрузок (X_3) по результатам программных испытаний (обозначения соответствуют рис.1).

Сложив обе составляющих функции корректировки накопленного повреждения, окончательно для факторов в натуральной форме получаем:

$$a_0 = 1,35 - 8,2X_1 + 3,2 \cdot X_1^2 + 5,5 \cdot X_2 - 1,8X_2^2 + 0,9X_1 \cdot X_2 + R_n(10,9 - 10,3 \cdot X_2). \quad (3)$$

Эта модель работает при $R_n > 0$. Если $X_1 < 0,4$, принимать $X_1 = 0,4$.

При фиксированном максимальном напряжении $\sigma_n > \sigma_{0,2}$ изменение асимметрии цикла с $R_n = 0,2$ до $R_n = 0,6$ увеличивает значения a_0 примерно вдвое, если уровни нагруженности основного процесса малы, и во столько же снимают a_0 , если параметры σ_ϕ и d_ϕ велики. Это можно частично объяснить упрочнением при предварительной пластической деформации, которое, как известно, увеличивает циклическую прочность при многоцикловом нагружении и снижает ее при малоцикловых нагрузках. Перегрузки с асимметрией $R_n = 0,6$ более влиятельны, чем при σ_ϕ , несмотря на то, что при высокой асимметрии нельзя создать большие относительные перегрузки X_1 . Вследствие этого кривые усталости при программном нагружении становятся более пологими при росте фактора R_n .

Подобное поведение более полно можно объяснить с позиций механики разрушения, поскольку отмечена аналогия между накоплением повреждении при перегрузках и развитием трещин при циклическом нагружении [1]. В механике разрушения эффекты асимметрии цикла объясняются напряжением закрытия трещины, которое уменьшает действительный КИН до эффективного. В данном случае вариация размаха напряжений с коэффициентом $R = 0,2$, очевидно, «выравнивается» напряжением закрытия трещины, в зону которого попадают цикловые минимальные напряжения перегрузок и максимальные напряжения основного процесса. По этой же причине нивелируется влияние на величину a_0 положительных асимметрий цикла основного процесса, и фактор R_ϕ принят незначимым.

При больших коэффициентах R минимальные цикловые напряжения находятся выше напряжения закрытия трещины и вся прикладываемая нагрузка участвует в развитии повреждений.

Рандомизированная последовательность блоков, использованных для программного нагружения, позволила установить значение межблочного повреждения $a_r = 0,92 - 1,32$. В этих испытаниях средние параметры ступеней составляли $\bar{d}_\phi^{-1} = 3,3 \cdot 10^5$, $\bar{d}_n^{-1} = 5,6 \cdot 10^4$, $\bar{R}_n = 0,38$, $n_n / n_\phi = 0,004$. Значения a_r из указанного диапазона получены также при испытаниях для двух блок – случайных процессов с перегрузками, где основные ступени характеризовались

$\bar{d}_{\phi 1}^{-1} = 3,3 \cdot 10^5$ и $\bar{d}_{\phi 2}^{-1} = 10^6$. Независимость величины a_r от среднего уровня основного процесса дает основание считать, что наклон кривой случайной усталости не изменяется относительно наклона кривой программной усталости. Вследствие этого возможно использовать полученные $a_r \geq 1$ для многорежимных процессов. Необходимо отметить, что для подобных процессов в области знакопеременных циклов наблюдались значения $a_r < 1$ [4]. Причины роста величины межблочного повреждения a_r при варьировании асимметрии цикла в знакопостоянной области связаны с усложнением структуры процесса, он становится более широкополосным и менее повреждающим, что и ведет к увеличению долговечности.

Полученная модель корректировки накопленного повреждения отражает сложные процессы, протекающие в материале при нестационарном нагружении с перегрузками. Недостаток полиномиальных моделей для корректировки величины a_0 заключается в необходимости экспериментального определения всех входящих коэффициентов, в отсутствии в них физического смысла. Несмотря на неоднозначность трактовки параметров процесса с перегрузками, на сложность создания универсальной модели оценки долговечности для таких процессов, работы в этом направлении заслуживают внимания. Это объясняется тем, что величина накопленного к предельному состоянию повреждения широко изменяется (в данном эксперименте от 0,3 до 2,7) выявление детерминированной составляющей итоговой долговечности дает более точный и достоверный прогноз [2].

Литература

1. Белодеденко С. В. Проектирование экономичных элементов конструкции по гарантированной долговечности// Проблемы машиностроения и надежности машин, - 2000. - № 6, - С. 101-107.
2. Белодеденко С. В. Оценка безопасной долговечности элементов конструкции при проектировании и эксплуатации технологического оборудования// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. - № - 6, – С. 40 – 46.
3. Гордиенко А. В., Белодеденко С. В. Суммирование относительных долговечностей при циклическом нагружении с малоцикловыми перегрузками // Механическая усталость материалов. – Киев, 1992. – т. 1,– С. 121 – 127.
4. Белодеденко С. В., Биличенко Г. Н., Козаков Д. Е. Накопление повреждений и оценка ресурса при нестационарном нагружении с перегрузками и случайной асимметрией цикла// Пробл. прочности, - 1997. - №2, - С. 49 -55.
5. Белодеденко С. В. Особенности сопротивления усталости высокопрочных сталей при повышенных асимметриях цикла // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: Тез. докл. междунар. Научно – техн. конф. – Киев, 2005. – С. 39 – 40.