

УДК 620.178.35

*А.В. Гриневиц¹, В.С. Ерасов¹, Н.А. Якушева¹, А.Л. Терехин¹***УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛИ ВКС-9
В УСЛОВИЯХ СИММЕТРИЧНОГО НАГРУЖЕНИЯ
«РАСТЯЖЕНИЕ–СЖАТИЕ» И «ИЗГИБ С ВРАЩЕНИЕМ»**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-11-11

Приведены результаты усталостных испытаний высокопрочной стали ВКС-9, разработанной для применения в шасси самолетов и других высоконагруженных деталях летательных аппаратов. Проиллюстрирована основная сложность разработки высокопрочных сталей, обусловленная тем, что несущая способность конструкции с концентратором напряжений оказывается существенно ниже предела прочности, определенного на стандартном образце. Наряду с оценкой сопротивления материала хрупкому разрушению критерий усталостного разрушения также является основой определения несущей способности. Исходя из аппаратного оснащения, отечественная практика испытаний на усталость базировалась на нагружении по схеме «изгиб с вращением». Американские справочники предоставляют данные по усталости, полученные при испытаниях по схеме нагружения «растяжение–сжатие». Для корректного сравнения данных по усталости проведены сравнительные испытания высокопрочной стали ВКС-9 по различным схемам нагружения. Установлено, что пределы ограниченной выносливости на базах 10^4 – 10^6 циклов при испытаниях по схеме нагружения «изгиб с вращением» превышают пределы выносливости, определенные при испытаниях по варианту «растяжение–сжатие».

Ключевые слова: высокопрочная сталь, усталостные испытания, хрупкое разрушение, пределы выносливости, циклическое нагружение, чистый изгиб с вращением.

The article presents the results of fatigue tests of high-strength steel VKS-9, designed for use in aircraft landing gears and other highly loaded parts of aircraft. Illustrated the main difficulty in the development of high strength steels, due to the fact that the bearing capacity of structures with stress concentrators is significantly below the tensile strength, determined on a standard sample. Along with the assessment of the resistance of material to brittle fracture criterion for fatigue failure is also the basis of determining the bearing capacity. Domestic practice test for fatigue based on the loading scheme «bending and rotation». American reference books provide data on fatigue when tested according to the scheme of loading «expansion-compression». For a correct comparison of fatigue data on comparative testing of high strength steel VKS-9 at various schemes of loading. It is established that the limits of fatigue on the bases 10^4 – 10^6 when tested by loading the «bending-rotation» exceeds the limits determined during the tests for option «tension-compression».

Keywords: high-strength steel, fatigue tests, brittle fracture, fatigue limits, cyclic loading, pure bending with rotation.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Проблема разработки высокопрочных материалов всегда являлась приоритетной для авиационного материаловедения, поскольку доминирующим критерием, характеризующим совершенство конструкции летательного аппарата, является отношение массы

полезного груза к массе конструкции. Единственным направлением в реализации существенного снижения массы конструкции является использование все более высокопрочных материалов, позволяющих уменьшить рабочее сечение детали. Для материала прочность ассоциируется, прежде всего, с характеристиками, полученными при стандартных испытаниях гладких образцов на одноосное растяжение, – пределом прочности (временное сопротивление) и пределом текучести материала. Однако оперирование конструкторами только показателями прочности, полученными при стандартных испытаниях на растяжение, привело к многочисленным авариям и катастрофам конструкций из высокопрочных материалов. Катастрофическое разрушение конструкции обусловлено переходом пластичного состояния материала в хрупкое, которое зависит от вида напряженно-деформированного состояния материала, влияния внешних факторов (температура, радиация, поверхностно-активная среда) и масштабного эффекта [1].

Влияние напряженно-деформированного состояния на несущую способность наглядно продемонстрировано в работе [2] для сталей с различным уровнем прочности. Для стального образца с надрезом несущая способность оказалась на уровне $\sigma_b^H=1300$ МПа при прочности $\sigma_b=2300$ МПа, определенной на гладком образце. Для стали с прочностью $\sigma_b=1350$ МПа образец с аналогичным надрезом показал несущую способность на уровне $\sigma_b^H=2250$ МПа. Надрез, создающий трехосное напряженно-деформированное состояние в материале образца, фактически поменял местами стали с разным уровнем прочности, выдвинув на первое место по несущей способности сталь с низким пределом прочности [3–5]. Поскольку в большинстве конструкций присутствуют концентраторы напряжений, то материаловед сталкивается с крайне сложной задачей обеспечения высокого уровня прочности для любых вариантов напряженно-деформированного состояния, в том числе и с учетом воздействия внешних факторов [6–12].

Всероссийский институт авиационных материалов (ВИАМ) является лидером по разработке материалов с предельно возможным уровнем прочности. В середине 50-х годов прошлого века в лаборатории «Конструкционные и специальные стали» разработали сталь марки ЭИ643 с пределом прочности $\sigma_b=200_{-10}^{+15}$ кгс/мм² (1960 МПа). Поскольку было очевидно, что повышение статической прочности стали может привести к снижению надежности конструкции из-за вероятности хрупкого разрушения были выполнены обширные прочностные испытания с привлечением модельных образцов. На образце-проушине получили овализацию отверстия при нагрузке 121000 кгс (1190 кН) без разрушения ушка серьги. Напряжения разрушения при изгибе трубчатых образцов значительно (в 1,5 раза) превышали предел прочности стандартных образцов, а потеря несущей способности происходила из-за потери устойчивости трубы в сжатой зоне. Испытания сварных модельных образцов из стали ЭИ643 при многократных статических нагрузках ($2 \cdot 10^3$ – $6 \cdot 10^3$ циклов нагружения) также показали высокую конструкционную прочность. Несмотря на положительные результаты по характеристикам статической усталости, применение стали было ограничено. Сталь марки ЭИ643 рекомендовалась для применения в деталях шасси, осях, болтах, шпильках, работающих на срез, и в других деталях, не имеющих значительных концентраторов напряжений.

Альтернативной разработкой лаборатории в области высокопрочных сталей явилась сталь марки ВКС-1 с уровнем прочности по техническим условиям (ТУ) не менее 190 кгс/мм² (1860 МПа). Сталь была рекомендована для обечаек емкостей разового действия, работающих кратковременно под внутренним давлением, причем оговаривалось,

что обечайки изготавливаются раскаткой без продольных швов. Следует отметить существенное уточнение содержания углерода в стали в процессе ее производства.

Перечень конструкционных высокопрочных сталей был дополнен разработками из сталей баллистического применения. Сталь КВК-42 с уровнем прочности не менее 190 кгс/мм^2 (1860 МПа) также предназначалась для тонкостенных емкостей с бесшовными обечайками изделий разового применения.

Формально, когда требования конструкторов к материалу деталей шасси повысились до 200 кгс/мм^2 (1960 МПа), ни одна отечественная сталь не удовлетворяла этим условиям, что привело в итоге к применению американской стали марки 300М для деталей шасси самолета МС-21. В справочнике MMPDS-02 наряду со статической прочностью стали 300М приводились ее усталостные характеристики, что обеспечивало возможность оценки ресурса шасси [13]. Отсутствие данных по усталостной долговечности высокопрочных сталей явилось основанием для проведения данной работы.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

Материалы и методы

Сотрудниками ФГУП «ВИАМ» (Э.А. Елисеевым, Н.Г. Покровской, Н.А. Самченко, Н.А. Якушевой) лаборатории «Конструкционные и специальные стали», возглавляемой В.И. Громовым, в сжатые сроки были выполнены исследования по разработке стали с прочностью 200 кгс/мм^2 (1960 МПа) для замены американской стали марки 300М. Ведущий научный сотрудник Н.Г. Покровская предложила использовать резервы вязкости разрушения стали ВКС-9 при жесткой регламентации углерода. Разработанная в середине 80-х годов прошлого столетия сталь ВКС-9 характеризовалась пределом прочности $\sigma_b=195\text{--}215 \text{ кгс}$ (1910–2100 МПа), относительным удлинением $\delta_5=9\%$, относительным сужением $\psi=40\%$ и вязкостью разрушения, достигающей $K_{1c}=300 \text{ кгс/мм}^{3/2}$ (95 МПа $\sqrt{\text{м}}$). Сталь рекомендовалась к производственному опробованию для изготовления механически обрабатываемых деталей, в том числе деталей шасси. Совершенствование метода выплавки с жесткой регламентацией содержания углерода позволило решить крайне сложную, как следует из вышесказанного, проблему – достижение уровня прочности не менее 200 кгс/мм^2 (1960 МПа).

Разработана технология изготовления крупногабаритных полуфабрикатов (поковки сечением 300×300 и 350×350 мм) из стали ВКС-9, выплавленной методом ИД (ВИ+ВДП). При выплавке содержание углерода находится в регламентированном диапазоне, обеспечивающем требования к статической прочности для стали. Аналогичные требования вынуждены соблюдать и американские разработчики стали 300М, что следует из градации механических характеристик, представленных в справочнике MMPDS-02.

Промышленное изготовление поковок сечением 300×300 и 350×350 мм осуществляли на АО «Металлургический завод «Электросталь». Научное сопровождение изготовления поковок, а также проведение всех технологических операций по изготовлению и термической обработке образцов осуществляли сотрудники лаборатории «Конструкционные и специальные стали» ФГУП «ВИАМ».

Разработанная во ФГУП «ВИАМ» сталь марки ВКС-9 предназначена для применения в высоконагруженных деталях и агрегатах летательных аппаратов, а также для замены американской стали 300М, используемой в настоящее время для изготовления шасси самолета МС-21.

Поскольку шасси самолета работает в условиях периодически повторяющихся нагрузок, то необходима оценка работоспособности материала в условиях действия

переменных напряжений [15, 16]. Усталостная долговечность зависит от множества факторов, среди которых определяющим является вид нагружения, характеризующий напряженно-деформированное состояние образца [17–19].

В отечественной практике масштабные исследования усталостной долговечности конструкционных материалов проводились на испытательных машинах, реализующих нагружение по схеме «чистый изгиб с вращением». Данный вариант испытаний имитирует напряженное состояние валов и осей большинства машин и механизмов, в которых действуют нагрузки, приводящие к изгибающим моментам. В этом случае, как и в реальных механизмах, реализуется цикл нагружения с коэффициентом асимметрии $R=-1$, который представляется наиболее опасным по отношению к циклам со средним напряжением. При нагружении по схеме «чистый изгиб с вращением» в образце реализуется неоднородное напряженно-деформированное состояние, когда максимальные напряжения возникают только на поверхности образца, а в центре образца они равны нулю.

В образце, испытываемом по варианту нагружения «растяжение–сжатие», создается однородное напряженно-деформированное состояние. При этом в процесс деформации включается все сечение образца, а не только поверхностные слои, как это имеет место для варианта «чистый изгиб с вращением». В американском справочнике MMPDS-02 усталостные характеристики приводятся для схемы нагружения «растяжение–сжатие».

Для корректного сравнения усталостных характеристик, полученных по различным схемам нагружения, проведены сравнительные испытания стали ВКС-9 как в условиях одноосного «растяжения–сжатия», так и «чистого изгиба с вращением».

Усталостные испытания в условиях «растяжение–сжатие» проводили на испытательной машине резонансного типа TESTRONIC 100 с блоком управления TOPP (рис. 1). Максимальная статическая нагрузка составляет 100 кН, размах переменной нагрузки 100 кН, точность измерения статической и переменной нагрузки 0,5%, стабильность переменной нагрузки лучше 0,5%. Эскиз и общий вид образца представлены на рис. 2.

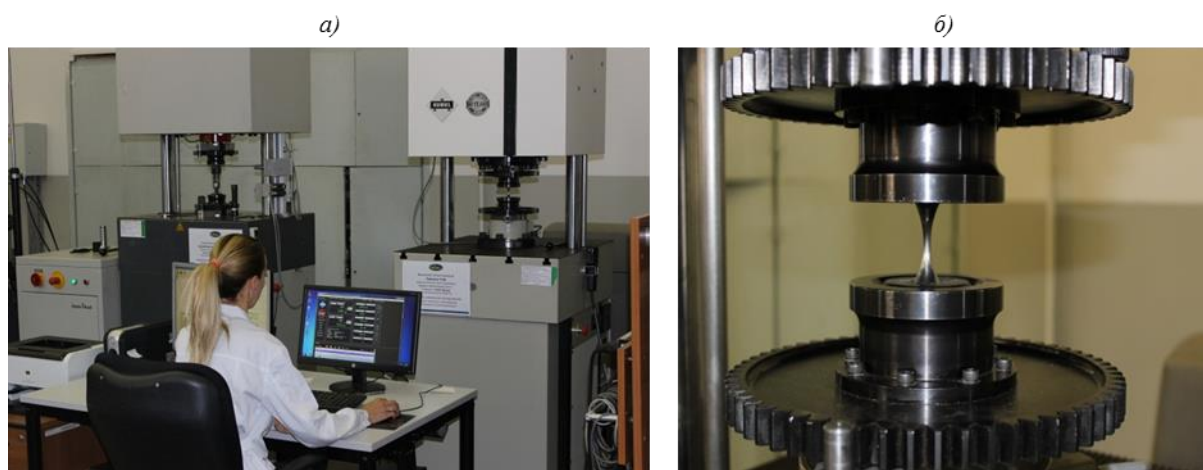


Рис. 1. Общий вид испытательной машины TESTRONIC 100 (а) и установленный в захваты машины образец (б)

Теоретический коэффициент концентрации напряжения для данного образца равен $K_t=1,02$ [3]. Испытания проводили в лабораторных условиях (температура испытаний $T=20\pm 5^\circ\text{C}$, влажность $\psi=35\text{--}45\%$) при асимметрии цикла «растяжение–сжатие» $R=-1$ и частоте испытаний $f=83$ Гц. Ось образцов соответствовала продольному направлению поковки. Для получения высокого качества рабочей поверхности образца использовали продольную полировку, позволяющую исключить в рабочей зоне поперечные риски, являющиеся одним из факторов значительного разброса усталостных характеристик.

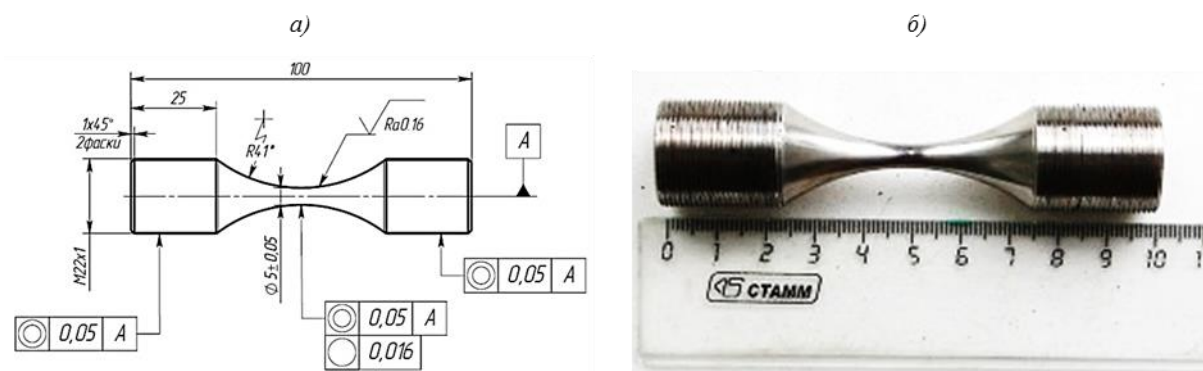


Рис. 2. Эскиз (а) и общий вид образца (б) при испытании по схеме «растяжение–сжатие»

Наряду с испытаниями по циклу «растяжение–сжатие» проведены испытания стали ВКС-9 в условиях «чистого изгиба с вращением». Испытания проводили на испытательной машине Zwick/Roell UBM 200. Максимальный изгибающий момент составит 200 Нм, класс точности 1, максимальная частота вращения шпинделя машины для усталостных испытаний 6000 об/мин. Регулировка частоты вращения обеспечила возможность проведения усталостных испытаний при изгибе с частотой, принятой при испытаниях в условиях «растяжение–сжатие». Частоту вращения шпинделя устанавливали 5000 об/мин, что соответствует частоте нагружения 83 Гц. Общий вид испытательной машины и зоны установки образца представлены на рис. 3.

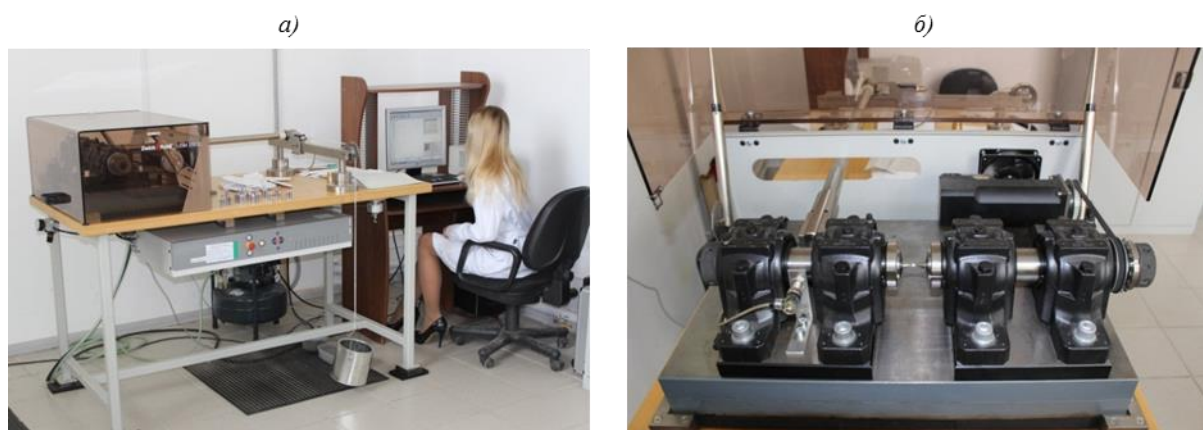


Рис. 3. Общий вид испытательной машины Zwick/Roell UBM 200 (а) и опоры с цанговыми захватами и с установленным образцом (б)

Оригинальность испытательной машины Zwick/Roell UBM 200 состоит в создании изгибающего момента в плоскости установочного стола в отличие от стандартных машин, в которых нагружающее устройство создает изгибающий момент в плоскости груза. Изгибающий момент на образце создается жестким рычагом, к которому прикладывается усилие через гибкую систему с нормируемым грузом. Рычаг крепится к опоре, в цанговый захват которого зажимается образец. Для передачи изгибающего момента на образец необходимо, чтобы опора с цанговым захватом была подвижна. Задача подвижности нагружающей опоры решается путем «вывешивания» ее на воздушной подушке для чего используется воздушный компрессор. При данном решении проблема учета усилия трения и его влияния на изгибающий момент отпадает. Сложности, вызванные необходимостью использовать воздушный компрессор, окупятся простотой и точной оценкой изгибающего момента.

Эскиз образца для испытания на чистый изгиб и его общий вид представлены на рис. 4.

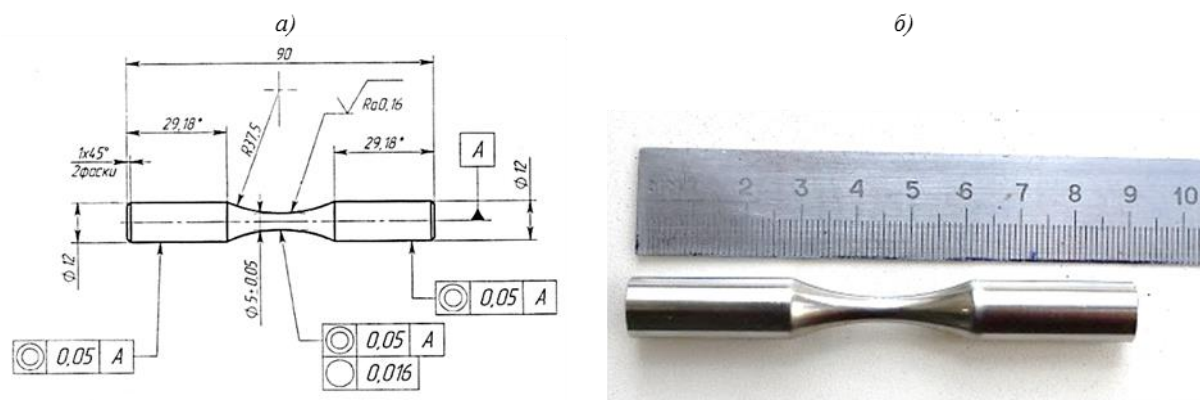


Рис. 4. Эскиз (а) и общий вид образца (б) для испытания по схеме «чистый изгиб с вращением»

Теоретический коэффициент концентрации напряжения для данного образца равен $K_f=1,02$. Испытания проводили в лабораторных условиях при асимметрии цикла $R=-1$ и частоте испытаний $f=83$ Гц. Заготовки под образцы вырезали в продольном направлении – ось образцов соответствовала продольному направлению поковки. Для получения высокого качества рабочей зоны образцов в качестве финишной операции применяли продольную полировку, аналогичную полировке образцов, испытываемых по циклу «растяжение–сжатие».

Результаты испытаний

Результаты усталостных испытаний в условиях схемы «растяжение–сжатие» представлены в табл. 1 и отражены на рис. 5, а.

Таблица 1

Результаты усталостных испытаний при «растяжении–сжатии» образцов из стали ВКС-9 из поковок сечением 350×350 и 300×300 мм (продольное направление)

Условный номер образца	Напряжение, МПа	N, цикл	Условный номер образца	Напряжение, МПа	N, цикл
551-7	1620	1800	551-1	890	188542
551-2	1520	2660	951-2	890	177700
131-11	1520	1810	951-5	890	437110
21-6	1520	2640	131-3	890	472560
131-12	1375	4600	331-3	890	31260
551-3	1375	7050	331-8	890	970690
21-7	1375	7190	131-16	890	76080
551-4	1235	15070	551-8	825	520700
131-13	1235	9580	131-4	825	1369340
21-8	1235	16680	951-3	825	1532720
551-5	1100	68730	331-10	825	2356830
131-1	1100	52530	131-17	825	331210
131-14	1100	40410	131-19	825	157500
331-1	1100	47110	331-4	825	2850820
331-6	1100	38180	331-9	825	1501670
21-9	1100	51370	551-9	755	>3000000
551-6	960	559840	131-5	755	>3000000
131-2	960	210110	951-4	755	721350
951-1	960	247660	131-18	755	>3000000
131-15	960	201910	131-20	755	2755740
331-2	960	151640	331-5	755	>3000000
331-7	960	155260	551-10	685	>3000000
21-10	960	102310	–	–	–

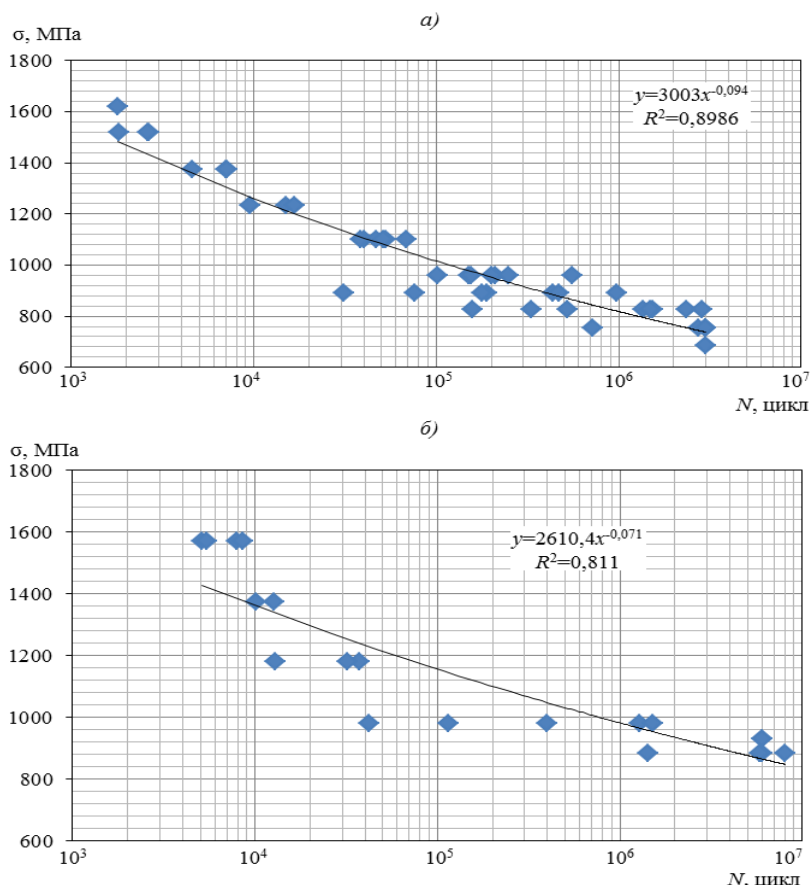


Рис. 5. Кривые усталости стали ВКС-9 при нагружении по схемам «растяжение–сжатие» (а) и «чистый изгиб с вращением» (б) с асимметрией цикла $R=-1$ и $K_r=1,02$

Максимальные растягивающие и сжимающие напряжения, действующие в образце в условиях чистого изгиба, определяли по формуле:

$$\sigma=32 \cdot M / 3,14 \cdot d^3=10,19 M / d^3,$$

где M – изгибающий момент; d – диаметр образца.

Результаты усталостных испытаний при «чистом изгибе с вращением» образцов из стали ВКС-9 из поковки сечением 300×300 мм представлены в табл. 2 и на рис. 5, б.

Таблица 2

Результаты усталостных испытаний в условиях «чистого изгиба с вращением» образцов из стали ВКС-9 из поковки сечением 300×300 мм (продольное направление)

Условный номер образца	Напряжение, МПа	N, цикл	Примечание	Условный номер образца	Напряжение, МПа	N, цикл	Примечание
103-9	1570	7900	–	103-18	980	42330	–
103-10	1570	5100	–	103-27	980	395630	–
103-11	1570	5440	–	103-28	980	1277900	–
103-25	1570	8600	–	103-29	980	1518900	–
103-13	1375	12750	–	103-23	930	6000000	Б/р*
103-15	1375	10180	–	103-24	930	6000000	Б/р
103-14	1180	12940	–	103-22	885	6000000	Б/р
103-16	1180	37060	–	103-20	885	1433750	–
103-26	1180	31850	–	103-21	885	5868960	–
103-17	980	114250	–	103-19	885	8000000	Б/р

* Без разрушения.

Для более наглядного сопоставления результатов усталостных испытаний данные, полученные при испытании в условиях «растяжение–сжатие» и при «чистом изгибе с вращением», представлены совместно на рис. 6. Анализ показывает, что при высоком уровне амплитуд усталостного цикла (>1000 МПа) разброс усталостных характеристик для образцов, испытанных на одном уровне напряжений, незначителен. Разброс по усталостным характеристикам существенно увеличивается при уменьшении амплитуды цикла и соответственно увеличению усталостной долговечности. Разброс значений почти на порядок при базах испытаний 10^6 циклов нагружения характерен для высокопрочных сталей, в том числе для сталей марок 300М и AISI 4340.

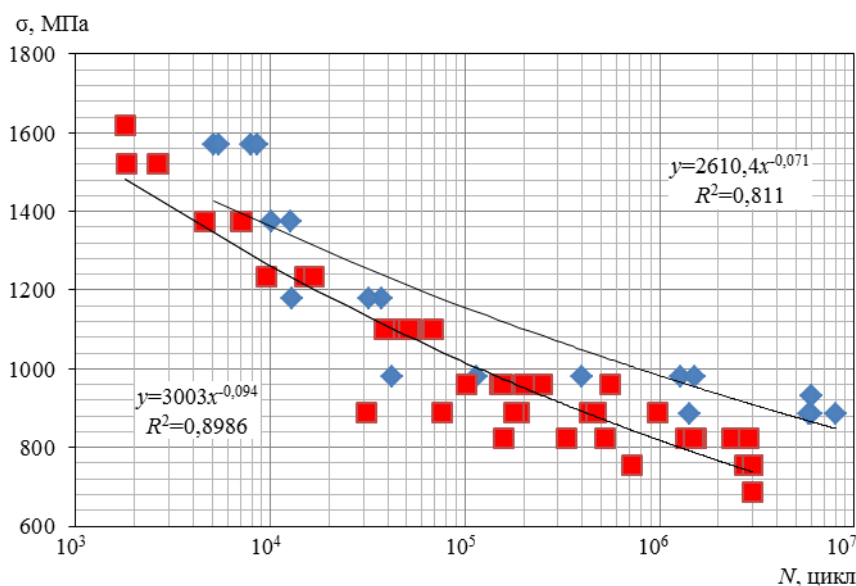


Рис. 6. Кривые усталости стали ВКС-9 при нагружении по схемам «растяжение–сжатие» (■) и «чистый изгиб с вращением» (◆)

Пределы ограниченной выносливости для образцов, испытанных при нагружении по схеме «растяжение–сжатие», оказываются несколько ниже показателей, полученных по схеме испытаний «чистый изгиб с вращением». Снижение предела ограниченной выносливости для цикла нагружения «растяжение–сжатие» по сравнению с «чистым изгибом с вращением» на базе испытаний 10^4 циклов нагружения составляет $\sim 7\%$. Увеличение базы испытаний до $2 \cdot 10^6$ циклов приводит к снижению значений, достигающему 19% . Снижение предела ограниченной выносливости при схеме испытаний «растяжение–сжатие» обусловлено большим вовлечением материала, работающего в условиях максимальных напряжений, тогда как при «чистом изгибе с вращением» максимальные напряжения затрагивают только поверхностные слои.

Пределы ограниченной выносливости для стали ВКС-9 для нагружения по схемам «чистый изгиб с вращением» и «растяжение–сжатие» составляют соответственно: 1200 и 1060 МПа на базе $6 \cdot 10^4$ циклов, 1100 и 940 МПа на базе $2 \cdot 10^5$ циклов и 1080 и 920 МПа на базе $3 \cdot 10^5$ циклов.

Поскольку ряд образцов (103-19, 103-22, 103-23, 103-24) не разрушились на базе испытаний $6 \cdot 10^6$ циклов, то их испытание было продолжено при более высоких напряжениях. Результаты испытаний образцов (103-19, 103-22, 103-23, 103-24), повторно испытанных по схеме «чистый изгиб с вращением», представлены в табл. 3.

Таблица 3

Усталостная долговечность образцов после повторных испытаний

Условный номер образца	Напряжение, МПа	N , цикл
103-19	980	906850
103-22	980	1087910
103-23	950	6000000 (Б/р*)
103-24	950	1875490

* Без разрушения.

Результаты повторных усталостных испытаний образцов из стали ВКС-9 подтвердили ее высокие характеристики ограниченной выносливости, которые практически не изменились, несмотря на значительную предварительную усталостную наработку.

Заключения

Проведены сравнительные усталостные испытания образцов из стали ВКС-9 при частоте нагружения 83 Гц и коэффициенте концентрации напряжений $K_t=1,02$ как в условиях нагружения «растяжение–сжатие» с коэффициентом асимметрии $R=-1$, так и симметричного нагружения «чистый изгиб с вращением».

Установлено, что значения пределов ограниченной выносливости при испытании гладких образцов из стали ВКС-9 при симметричном нагружении «чистый изгиб с вращением» превышают значения пределов ограниченной выносливости при нагружении «растяжение–сжатие» на базе 10^5 циклов – на 12%, а на базе 10^6 – на 16%.

Значения предела ограниченной выносливости на базе испытаний $6 \cdot 10^4$ циклов для гладких образцов из стали ВКС-9 находятся на уровне: 1200 МПа при нагружении по схеме «чистый изгиб с вращением» и 1060 МПа при симметричном нагружении по схеме «растяжение–сжатие».

ЛИТЕРАТУРА

1. Серенсен С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. М.: Атомиздат, 1975. 192 с.
2. Ужиг Г.В. Прочность в машиностроении. М.: Машиностроение, 1958. 68 с.
3. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 302 с.
4. Бойцов Б.В. Надежность шасси самолета. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.
5. Одесский П.Д., Шувалов А.Н., Емельянов О.В. Оценка сопротивления зарождению усталостных трещин в сварных соединениях стальных конструкций // Деформация и разрушение. 2016. №9. С. 30–35.
6. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Плешаков В.С. и др. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. №2. С. 85–96.
7. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. №6. С. 107–111.
8. Геров М.В., Владиславская Е.Ю., Терентьев В.Ф. и др. Исследование усталостной прочности сплава Ti–6Al–4V, полученного методом селективного лазерного плавления // Деформация и разрушение. 2016. №5. С. 14–20.
9. Беляев М.С., Горбовец М.А. О разрыве кривых малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 103–108. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-s4-103-108.
10. Гриневиц А.В., Румянцев Ю.С., Морозова Л.В., Терехин А.Л. Исследование усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163-Т и В95о.ч.-Т2 после поверхностного упрочнения //

- Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 93–102. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-s4-93-102.
11. Каблов Е.Н., Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Жегина И.П., Фомина М.А. Исследование влияния коррозионной среды на процесс накопления повреждений и характер разрушения конструкционных алюминиевых сплавов 1441 и В-1469 при испытаниях на растяжение и малоцикловую усталость // Материаловедение. 2017. №1. С. 41–48.
 12. Писарев В.С., Матвиенко Ю.Г., Елеонский С.И., Одинцев И.Н. Влияние малоцикловой усталости на параметры механики разрушения по данным метода спекл-интерферометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. №6. С. 44–56.
 13. Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS). Federal Aviation Administration, 2005. P. 2-59–2-62.
 14. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
 15. Бойцов Б.В., Кишкина С.И., Кравченко Г.Н. и др. Долговечность шарнирно-болтовых соединений летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1996. 256 с.
 16. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ЦИАМ, 2013. 515 с.
 17. Кузьмин О.В., Тихомирова Е.А., Сундуков М.Ю., Азизов Г.Н., Сидохин Е.Ф. Новый способ термоциклических испытаний сопротивления материала термической усталости в авиационном производстве // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 51–53.
 18. Муравьев В.В., Муравьева О.В. Оценка роста усталостных трещин в боковых рамах тележек грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом // Деформация и разрушение. 2016. №9. С. 24–29.
 19. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М., Гольдберг М.А. Малоцикловая усталость при заданной деформации и параметры упругопластического деформирования жаропрочного сплава ВЖ175 // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 87–92. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-s4-87-92.