

УДК 620.178.3:620.194.8

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ

Пачурин Г.В.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижний Новгород, e-mail: PachurinGV@mail.ru

Большинство металлоизделий в процессе эксплуатации подвергается воздействию циклических нагрузок, как на воздухе, так и в присутствии коррозионной среды. В процессе изготовления деталей большинство металлов и сплавов подвергаются различным видам и режимам технологической обработки, среди которых наиболее распространенным и является пластическое деформирование. В работе были исследованы широко применяемые в промышленности нержавеющие стали аустенитного и мартенситного классов. Получены механические характеристики материалов при статическом растяжении, построены кривые упрочнения, усталости, изменения текущего прогиба в процессе циклического нагружения и сравнительные вероятностные кривые распределения циклической долговечности на воздухе и в коррозионной среде после различных режимов обработки. Установлено, что влияние степени и скорости предварительной пластической деформации на эксплуатационную долговечность нержавеющих сталей неоднозначно и существенно зависит от их структуры, среды и величины амплитуды циклического нагружения. Разработанные практические рекомендации по оптимизации режимов технологической обработки нержавеющих сталей позволили улучшить эксплуатационные свойства изделий на ряде предприятий авиационной и автомобильной промышленности.

Ключевые слова: нержавеющие стали, упрочнение, деформация, циклическая долговечность, микроструктура, повреждение, фрактография, скорость деформации, степень деформации, коррозионная среда

IMPROVING OPERATIONAL LIFE STAINLESS STEEL AND TECHNOLOGICAL HARDENING

Pachurin G.V.

FGBOU VPO «Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev», Nizhny Novgorod,
e-mail: PachurinGV@mail.ru

Most of the metal during operation is subjected to cyclic loading, both in air and in the presence of a corrosive environment. In the process of manufacturing parts, most metals and alloys subjected to various types and modes of processing, among which the most common is plastic deformation. In this paper, have been studied widely used in the industry stainless steel austenitic and martensitic grades. Mechanical characteristics of the materials obtained in the static tensile hardening curves constructed, fatigue, changes in the current deflection during cyclic loading and comparative probability distribution curves of cyclic durability in air and in a corrosive environment after various treatment regimens. It is established that the effect of the extent and rate of the preliminary plastic deformation on operational life of stainless steel and substantially uniquely depends on the structure of the medium and the amplitude cyclic loading. Developed practical recommendations on optimization of processing stainless steels have improved the performance of the product in a number of companies in the aircraft and automotive industries.

Keywords: stainless steel, hardening, strain, cycle life, microstructure, damage, fractography, strain rate, the degree of deformation, the corrosive environment

Эксплуатация большинства металлоизделий сопровождается воздействием циклических нагрузок, как на воздухе, так и в присутствии коррозионной среды. Их надежность наряду с конструктивными факторами определяется структурой и свойствами используемых материалов, в значительной мере зависящих от вида и режима их технологической обработки.

В процессе изготовления изделий большинство металлов и сплавов подвергаются различным видам и режимам технологической обработки, среди которых наиболее распространенным и производительным является пластическое деформирование (штамповка, прокатка и др.). Сведения же по сопротивлению деформированных с разной скоростью и степенью деформации нержавеющих сталей усталостному разрушению на воздухе ограничены, а в присут-

ствии коррозионной среды – практически отсутствуют [8]. В качестве критерия выбора оборудования и режимов изготовления деталей часто руководствуются любыми критериями (например, экономичность, технологичность процесса формообразования и т.п.), только не долговечностью штампованных изделий [9]. Поэтому исследования в данном направлении представляют как теоретический, так и практический интерес.

Материалы и методы исследования

Для решения этой задачи нами были выбраны широко применяемые в промышленности нержавеющие стали разных классов (аустенитного – 12X18H10T, ЭИ878-M1 и мартенситного – 40X, 20X13, 14X17H2, ВНС-2М).

Стандартные плоские образцы предварительно осаживались на гидропрессе ДО-436 ($0,08 \text{ с}^{-1}$) и падающем молоте МЛ-3 (100 с^{-1}) через подкладной

инструмент до степеней деформации от 0 до 40%, а цилиндрические растягивались на разрывной машине ZD 10/90 с различными скоростями деформации (0,0011; 0,0056 и 0,028 с⁻¹). Термообработка образцов осуществлялась по заводской технологии. Статические испытания на разрыв проводились на машине «Instron-1115». Знакопеременное нагружение плоских образцов осуществлялось на специально спроектированной [3] двухпозиционной машине по «жесткой» схеме симметричного консольного изгиба частотой 25 Гц, а цилиндрических – на машине МИП-8 по симметричному консольному круговому изгибу с частотой 50 Гц, оснащенной микроскопом с фазосинхронизатором и стробоскопическим освещением для наблюдения возникновения и развития микроструктурной повреждаемости поверхности опасного сечения образца в процессе циклического нагружения. Для испытания цилиндрических образцов в коррозионной среде использовалось специальное устройство [1, 4]. В качестве коррозионной среды использовался широко распространенный и достаточно агрессивный по отношению к сталям 3%-й водный раствор морской соли.

Натурные испытания штампованных изделий типа гофровых панелей проводились на специальных стендах по пульсирующему циклу от нулевого сдвига силой 30 кН (частота 0,2 Гц). Микроструктура и фрактографические особенности изломов образцов и готовых панелей изучались на оптическом и электронном уровне.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам исследований получены механические характеристики материалов при статическом растяжении, построены кривые упрочнения, усталости, изменения текущего прогиба в процессе циклического нагружения и сравнительные вероятностные кривые распределения циклической долговечности на воздухе и в коррозионной среде после различных режимов обработки.

Анализ полученных данных показывает, что с ростом степени предварительной деформации $\varepsilon_{\text{пр.д.}}$ материалов, их условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ возрастают, а показатели пластичности (относительные удлинение δ и сужение ψ) снижаются тем значительней, чем ниже энергия дефектов упаковки (э.д.у.) материала [5]. При этом кривые упрочнения для каждого материала располагаются тем выше и положе, чем больше степень и скорость их пластической деформации.

Установлено также, что влияние степени и скорости предварительной пластической деформации на сопротивление усталостному разрушению зависит от природы материала, его структурного состояния, а также амплитуды и среды циклического нагружения [2, 6, 7].

Предварительное растяжение до 25% термообработанной (1050°C; охлаждение на воздухе) аустенитной нержавеющей

стали 12X18H10T приводит к увеличению ее долговечности при всех амплитудах нагружения, что может быть связано с развитием в процессе предварительной деформации фазового превращения-распада твердого раствора (аустенита) с выделением дисперсных частиц (α' – мартенсит) по границам субзерен, которые являются барьерами для движения дислокаций, способствующих повышению ее сопротивления усталостному разрушению.

Несколько иначе ведут себя образцы из холоднокатаной стали 12X18H10T. У них при малых степенях $\varepsilon_{\text{пр.д.}}$ (2; 5%) наблюдается «провал» долговечности, который с понижением амплитуды напряжения смещается в область более высоких деформаций. При этом уменьшается период до зарождения усталостной трещины и увеличивается скорость ее последующего развития.

Такое снижение пределов выносливости металлов после малых степеней предварительной деформации объясняется более легким (по сравнению с недеформированным состоянием) зарождением усталостных трещин по полосам скольжения, образованием в процессе предварительной деформации легкоподвижных (свободных от атмосфер) или свежих дислокаций, характером изменения кривых предельной прочности и остаточных напряжений. Кроме того, в поликристаллическом материале при малых степенях деформации из-за ее неоднородности в отдельных кристаллах возникают ориентированные «пики» остаточных микронапряжений, величина которых наибольшая при малых деформациях.

В случае очень высоких амплитуд приложенного напряжения для стали 12X18H10T кривые зависимости долговечности от наклепа имеют максимум при степени 5% (при $\sigma_{\text{а}} = 450$ МПа долговечность увеличивается в 1,2 раза). Для низких напряжений долговечность образцов из этой стали резко уменьшается при увеличении деформации от 0 до 5%, несколько возрастает при степени 13% и снова снижается при степени 25%.

Влияние степени предварительной осадки плоских образцов из аустенитной стали ЭИ878-М1 на их долговечность также существенно зависит от скорости деформации (на молоте и гидропрессе) и уровня приложенного напряжения. С ростом степени деформации сопротивление усталостному разрушению сплава повышается больше после штамповки на молоте, чем на прессе.

Так, например, при низких уровнях приложенного напряжения (400 МПа) с ростом предварительной пластической деформации долговечность сплава вначале увели-

чивается с $4,06 \cdot 10^4$ циклов в исходном состоянии до $1,92 \cdot 10^6$ циклов после осадки на молоте ($\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 22\%$) и $1,67 \cdot 10^5$ циклов на прессе ($\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 10\%$), а затем незначительно уменьшается – до $1,62 \cdot 10^6$ циклов ($\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 36\%$) и $1,53 \cdot 10^5$ циклов ($\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 22\%$), соответственно.

Усталостная прочность сплава ЭИ-878-М1 с увеличением степени наклепа повышается, особенно после осадки на молоте, например, на базе 10^5 циклов ($\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 22\%$) в 1,7 раза по сравнению с 1,27 раза при деформации на гидропрессе.

В случае высоких амплитуд циклического нагружения, как и для сталей 20X13 и 14X17H2, рост степени предварительной деформации вызывает монотонное повышение долговечности образцов из данного сплава, более существенное после штамповки на молоте, чем на гидропрессе.

Циклическая долговечность отштампованных на молоте (скорость деформации 10^2 с^{-1}) гофровых панелей из данного сплава в 2,9 раза выше, чем деформированных на прессе (скорость деформации $8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$). При этом фрактографический анализ усталостных изломов авиационных изделий из стали ЭИ878-М1 показал, что развитие усталостных трещин в гофровой панели, отштампованной на гидропрессе, имеет многоочаговый характер, в то время как на фрактурации излома панели, отштампованной на молоте, четко просматривается более спокойное и плавное распространение трещин. Положительный эффект предварительной деформации на повышение сопротивления усталости панелей обусловлен изменением структуры материала, которая после штамповки на молоте имеет равномерное волокнистое строение. Металлографические и фрактографические исследования показали, что при больших степенях деформации (36% на молоте и 22% на прессе) в структуре материала появляются несплошности между волокнами прокатки в результате их расслоения. Их количество и длина растут по мере увеличения наклепа и при осадке на молоте до 36% появляются микротрещины, пересекающие волокна.

Стали мартенситного класса после термической (закалка с высоким отпуском) и пластической обработки в процессе усталости разупрочняются с наличием стадии стабилизации изменения текущего прогиба. С первых же циклов нагружения в некоторых зернах мартенситных сталей появляются редкие полосы скольжения. Затем развивается скольжение по первичным и вторичным плоскостям, образуются микротрещины, распространению которых препятствуют дисперсные частицы. В кон-

це этой стадии появляется усталостная макротрещина ($\sim 1 \text{ мм}$) на поверхности образца, распространяющаяся в глубь его на последующих этапах быстрого разупрочнения и окончательного долома. Влияние предварительной деформации на их сопротивление усталостному разрушению определяется амплитудой приложенного напряжения.

Так увеличение степени предварительной деформации стали 40X при высоких амплитудах (например, 500 МПа) на воздухе приводит вначале к росту циклической долговечности (с $1,22 \cdot 10^3$ до $1,06 \cdot 10^4$ циклов при $\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 5\%$), затем к некоторому ее снижению (до $5,29 \cdot 10^3$ циклов при $\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 10\%$) и последующему увеличению до $1,28 \cdot 10^4$ циклов при деформации 29%.

При низких уровнях приложенного напряжения циклическая долговечность имеет максимум при деформации 10%. Так при $\sigma = 200 \text{ МПа}$ долговечность увеличивается с $1,19 \cdot 10^5$ до $9,37 \cdot 10^5$ циклов при $\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 10\%$, а затем после деформации 22% снижается до $8,12 \cdot 10^5$ циклов.

Деформация на 5% приводит к некоторому снижению коррозионной долговечности (с $6,3 \cdot 10^3$ до $5,2 \cdot 10^3$ циклов при напряжении 500 МПа и с $3,22 \cdot 10^5$ до $1,33 \cdot 10^5$ циклов при 200 МПа), а на 22% – к увеличению (до $1,02 \cdot 10^4$ циклов при амплитуде 500 МПа и до $2,59 \cdot 10^5$ циклов при 200 МПа). При этом для малых амплитуд напряжения коррозионная долговечность стали 40X в исходном состоянии все же выше, чем деформированной даже на 22%.

Усталостное разрушение закаленной и высокоотпущенной стали 40X при высоких амплитудах напряжения начинается на поверхности из нескольких источников. Бороздки высокоамплитудного усталостного разрушения обуславливаются исходной структурой, в то время как рельеф низкоамплитудного разрушения этой стали только бороздчатый. Долом образцов при высоких напряжениях всегда оказывается вязким (ямочным), а при низких – наблюдаются сколы.

Для закаленных с высоким отпуском сталей 20X13 и 14X17H2 мартенситного класса влияние степени предварительной деформации на ограниченный предел выносливости σ_{RN} и долговечность N также зависит от амплитуды приложенного напряжения.

При высоких амплитудах ($N < 10^4$ циклов) предварительная деформация увеличивает N и σ_{RN} стали 20X13, но эффект величины $\varepsilon_{\text{пр.д.}}$ практически не обнаруживается. При амплитудах, соответствующих $N > 10^4$ циклов, σ_{RN} и N этой стали

уменьшается с ростом $\varepsilon_{\text{пр.д.}}$, особенно при $\varepsilon_{\text{пр.д.}}=5$ и 13%, и тем в большей степени, чем ниже σ_a , как и для стали 14X17H2 при $N > 10^3$ циклов, у которой, однако, $\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 25\%$ вызывает повышение долговечности по сравнению с $\varepsilon_{\text{пр.д.}} = 5$ и 13% почти до уровня долговечности недеформированных образцов.

Сопротивление коррозионной усталости сталей 20X13 и 14X17H2 в области больших амплитуд напряжения более высокое, а в области малых σ_a , наоборот, более низкое, чем при испытании на воздухе.

Растяжение образцов (до 25%) приводит к повышению долговечности в коррозионной среде при высоких амплитудах испытания, но оказывается ниже, чем на воздухе при низких напряжениях. Например, при амплитуде 380 МПа после $\varepsilon_{\text{пр.д.}}=25\%$ коррозионно-циклическая долговечность сталей 14X17H2 и 20X13 снижается соответственно в 1,51 и 1,26 раза по сравнению с их долговечностью на воздухе.

Анализ результатов усталостных испытаний образцов из закаленных и высокоотпущенных сталей 20X13 и 14X17H2 для разных скоростей ($\dot{\varepsilon} = 1,1 \cdot 10^{-3}$; $5,6 \cdot 10^{-3}$ и $2,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$), предварительной деформации растяжением на 25% показывает, что у обеих сталей ниже всех располагаются кривые усталости при $\dot{\varepsilon} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, а тангенс угла наклона их в этом случае наибольший.

При высоких σ_a долговечность постоянно увеличивается с ростом $\dot{\varepsilon}$. В многоцикловогой же области повышение $\dot{\varepsilon}$ от $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ до $5,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ значительно повышает долговечность сталей, например, при $\sigma_a = 300 \text{ МПа}$ в ~3,0 раза для стали 20X13 и в 2,0 раза для стали 14X17H2. Дальнейший рост $\dot{\varepsilon}$ до $2,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ незначительно снижает циклическую долговечность этих материалов: в 1,07 и 1,21 раза у сталей 20X13 и 14X17H2, соответственно.

Структура поверхности изломов этих сталей (хрупкая с вязким доломом) изменяется незначительно в зависимости от степени предварительной деформации, но доля вязкого долома уменьшается в изломе с ростом степени и скорости деформации. Коррозионно-усталостное разрушение развивается, как правило, из нескольких очагов и инициируется коррозионным повреждением поверхности, однако структура изломов в этом случае также хрупкая с вязким доломом.

Анализ полученных в работе кривых изменения относительной величины усталостной зоны L/d образцов с ростом их долговечности показал, что в общем случае для всех групп исследованных материалов, режимов их технологической обработки

и среды испытания зона усталостного разрушения растет с увеличением их циклической долговечности. Сопоставление фрактোগрафии усталостных изломов образцов с соответствующими кривыми прогиба выявило рост прогиба с увеличением глубины усталостной трещины. Циклическая долговечность до полного разрушения образца и размер зоны стабильного роста усталостной трещины в его изломе с увеличением амплитуды приложенного напряжения уменьшаются.

Долговечность пассивированных после термообработки (505 °С, 2,5 часа; охлаждение на воздухе) плоских образцов из мартенситной стали ВНС-2М выше, чем только термообработанных и, например, при амплитуде напряжений 750 МПа составляет $4,05 \cdot 10^4$ циклов против $1,38 \cdot 10^4$ циклов, соответственно.

Предварительная осадка образцов с последующей термообработкой, как правило, повышает их циклическую долговечность. Однако, при высоких амплитудах напряжений осадка на молоте до 5% приводит к некоторому снижению долговечности. Так при напряжении 850 МПа долговечность деформированных до 5% на молоте образцов снижается в 1,6 раза, в то время как при этой же степени деформации на прессе – возрастает в 2,0 раза. При низких амплитудах напряжений (например, 750 МПа) долговечность образцов из этой стали, осажённых на молоте и прессе до степени 10% с последующей термообработкой, возрастает в 3,04 и 1,89 раза соответственно по сравнению с недеформированными образцами.

Эффект скорости предварительной деформации на долговечность сплава ВНС-2М также зависит от амплитуды приложенного напряжения. Так, если при напряжении 850 МПа, долговечность стали после осадки на молоте до 22% ($1,19 \cdot 10^4$ циклов) почти соответствует долговечности после осадки на прессе до 10% ($1,24 \cdot 10^4$ циклов), то при напряжении 750 МПа ее величина для образцов, осажённых до 22% на молоте несколько (в 1,1 раза) выше, чем деформированных до этой же степени на прессе. При этом структура материала более мелкодисперсная, чем в исходном (недеформированном) состоянии.

Наблюдаемое повышение сопротивления усталостному разрушению с ростом степени предварительной осадки образцов подтверждается натурными испытаниями штампованных гофровых панелей из этой стали. Кривая распределения циклической долговечности отштампованных на молоте натуральных гофровых панелей из стали

ВНС-2М и статистическая обработка результатов этих испытаний выявили малый разброс экспериментальных данных (менее 1%), что свидетельствует о высокой стабильности усталостных свойств этого сплава. Местом зарождения усталостных трещин является участок перехода с гофра на плоскую часть панели, где наряду с возможным действием концентратора напряжений имеет место практически нулевая степень предварительной пластической деформации, что также подтверждает полученные на образцах выводы об увеличении циклической долговечности с ростом степени предварительной осадки образцов.

Выводы

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Полученные механические характеристики при статическом растяжении, уравнения кривых усталости и сравнительные вероятностные кривые распределения циклической долговечности нержавеющей сталей аустенитного и мартенситного класса после термической и объемной пластической деформации позволяют повысить точность оценки эксплуатационной надежности и обеспечить снижение, в ряде случаев, металлоемкости деталей и механизмов в целом.

2. Установлено, что влияние степени и скорости предварительной пластической деформации на эксплуатационную долговечность нержавеющей сталей неоднозначно и существенно зависит от их структуры, среды и величины амплитуды циклического нагружения.

3. Показано, что коррозионная среда ускоряет процесс зарождения усталостного повреждения, что приводит при низкоамплитудном нагружении к снижению в 1,5...2 раза сопротивления усталости исследованных сталей. Пластическое деформирование (в пределах равномерной деформации) образцов и готовых изделий из нержавеющей сталей обуславливает повышение их сопротивления коррозионно-усталостному разрушению. Этот эффект более

существенно проявляется после высокоскоростной штамповки (в частности на молоте), поэтому одним из путей повышения эксплуатационной долговечности на воздухе и в коррозионной среде является увеличение степени и скорости предварительной пластической деформации сталей.

4. Разработанные на основе полученных экспериментальных данных практические рекомендации [2, 10] по оптимизации режимов технологической обработки нержавеющей сталей с целью улучшения их эксплуатационных свойств внедрены на ряде предприятий автомобильной и авиационной промышленности.

Список литературы

1. А.с. 920456 СССР. Устройство для испытаний на усталость при изгибе вращающегося образца / Г.В. Пачурин, Г.П. Гусякова // Открытия. Изобретения. 1982. № 14. С. 158.
2. Власов В.А., Пачурин Г.В., Гусякова Г.П. Коррозионная усталостная прочность пластически обработанных материалов // Автомобильная промышленность. 1996. № 8. С. 24-25.
3. Пачурин Г.В., Гусякова Г.П. Двухпозиционная установка для усталостных испытаний тонколистовых сварных образцов // Заводская лаборатория. – 1980. № 10. – С. 969.
4. Пачурин Г.В., Гусякова Г.П. К испытанию образцов на консольный круговой изгиб при низких температурах // Завод. лаб. – 1981, № 11. – С.89-90.
5. Пачурин Г.В. Эффект пластической обработки сталей и их сварных соединений // Коррозия: материалы, защита. 2003. № 3. С. 6-9.
6. Пачурин Г.В. Долговечность штампованных конструкционных материалов на воздухе и в коррозионной среде // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 10. С. 21-27.
7. Пачурин Г.В. Долговечность на воздухе и в коррозионной среде деформированных сталей // Технология металлов. 2004. № 12. С. 29-35.
8. Пачурин Г.В. Повышение коррозионной долговечности и эксплуатационной надежности изделий из деформационно-упрочненных металлических материалов. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. 132 с.
9. Пачурин Г.В., Гушин А.Н. и др. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в разных условиях нагружения: учеб. Пособие / Г.В. Пачурин, А.Н. Гушин, К.Г. Пачурин, Г.В. Пименов. – Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2005. – 139 с.
10. Пачурин Г.В. Долговечность пластически деформированных коррозионно-стойких сталей // Вестник машиностроения. 2012. № 7. С. 65-68.