номить энергию и ресурсы, создавать новые материалы с заранее заданными свойствами и, наконец, рассчитывать эти системы с возможно большей полнотой и полезностью.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Пачурин Г.В.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, Россия

OPTIMIZATION OF PLASTIC SURFACE TREATMENT TO IMPROVE RELIABILITY, OPERATING METAL

Pachurin G.V.
Nizhny Novgorod State Technical University, RE Alekseeva, N. Novgorod, Russia

Анализ литературных данных и результаты оригинальных исследований показывают [1-3], что различная пластическая деформация всего объема или только поверхности металла (ППД) не однозначно влияет на его циклическую долговечность в зависимости от амплитуды нагружения.

В настоящей работе представлены результаты сопоставления оптимальных режимов предварительной обработки, максимально повышающих долговечность материалов при амплитуде $\sigma_a \approx 0{,}5\ \sigma_B$ и сопротивление усталости на базе 10^5 циклов на воздухе и в коррозионной среде. Оказывается, что наиболее существенное улучшение сопротивления разрушению при циклическом нагружении материалов наблюдается после комбинированных методов ППД.

Так предел выносливости на базе 10^5 циклов сварных соединений из стали 12Х18Н10Т возрастает в 1,26 раза после режима обработки: термическая, пластическая растяжением на 5…16%, пластическая обдувкой дробью, и в 1,03 раза после только одного растяжения до 7-10%. Циклическая долговечность в коррозионной среде (3%-ный водный раствор морской соли) сварных соединений из стали 12Х18Н10Т в результате двухстороннего дробеструйного упрочнения сварного шва увеличивается в 1,33 раза, но после растяжения на 7-10% снижается на 22%.

Наиболее эффективными технологическими способами повышения циклической долговечности сварных соединений являются термическая обработка и поверхностное пластическое деформирование материала шва и околошовной зоны.

В процессе электродуговой сварки происходит изменение структуры стали, приводящее к появлению высоких остаточных растягивающих напряжений в области шва (100 МПа на глубине до 0,08 мм) и снижению сопротивления усталости. Сварной шов характеризуется тонкодисперсным строением (аустенит и δ-феррит). Ширина шва (встык) равна 3-5 мм. Результаты испытаний показывают, что двустороннее упрочнение сварного шва улучшает его сопротивление знакопеременным нагрузкам. Термообработка (нагрев до 975 °С, 5 мин, охлаждение на воздухе) сварных образцов снижает предел выносливости и циклическую долговечность, но при этом уменьшается разброс экспериментальных данных за счет выравнивания свойств по всему объему материала и снятия внутренних напряжений.

Операция «термоправки» заметно ухудшает сопротивление усталости сварных термообработанных образцов.

Термообработка (нормализация) сварного шва перед операцией поверхностного упрочнения пучком проволоки благоприятно сказывается на усталостных свойствах стали 12Х18Н10Т. Так, при уровне приложенного напряжения 420 МПа долговечность сварных образцов после термообработки и упрочнения пучком проволоки в 9,5 раза больше, чем у образцов, обработанных только пучком проволоки.

Эффективный и производительный метод упрочнения пучком проволоки позволяет обрабатывать неровные поверхности, что обусловливает его широкое распространение в производстве. Однако этот способ обработки в нашем случае дает более низкие результаты, чем пневмодробеструйная обработка, из-за тонкого сечения (2 мм) образцов, для которых нецелесообразна большая глубина наклепа.

Долговечность при $\sigma_a = 320$ МПа образцов после пневмодробеструйной обработки с

двух сторон (давление воздуха 0,4 МПа; время 1 мин; диаметр дроби 0,6-1,0 мм) составляет $6{,}6 \cdot 10^6$ циклов, в то время как у холоднокатаной стали 12Х18Н10Т без сварки она равна $2{,}75 \cdot 10^5$ циклов. Введение операции термообработки перед термоправкой сварных образцов повышает циклическую долговечность стали в коррозионной среде.

Лучшим сопротивлением коррозионно-усталостному разрушению обладают сварные соединения стали 12Х18Н10Т с дробеструйным упрочнением, особенно при обработке шва с двух сторон. Предварительная деформация растяжением на 5, 10 и 16% сварных образцов из этой стали приводит, за счет наклепа, к увеличению низкоамплитудной долговечности на воздухе. Деформация же до 25% уменьшает циклическую долговечность. Сварные образцы из стали 12Х18Н10Т, деформированные растяжением до 7-10%, имеют число циклов до разрушения на 56,9% ниже в коррозионной среде, чем на воздухе.

Предлагаемый режим обработки сварных соединений из нержавеющих сталей аустенитного класса типа 12Х18Н10Т: термообработка (нагрев до 975 °С, 5 мин, охлаждение на воздухе), растяжение до степени 5…16%, упрочнение пневмодробеструйное (давление воздуха 0,4 МПа; диаметр дроби 0,6-1,0 мм; время 1 мин) с двух сторон (авторское свидетельство №1058747) – полностью устраняет возможный отрицательный эффект предварительного растяжения; обеспечивает снижение величины остаточных растягивающих напряжений и равномерное их распределение по сечению сварного образца; увеличивает циклическую долговечность (в 2,2 раза при амплитуде 420 МПа) сварных образцов и натурных изделий из тонколистовой стали 12Х18Н10Т по сравнению с пневмодробеструйной обработкой сварного шва с двух сторон. При этом наблюдается относительно однородная, мелкодисперсная структура стали в околошовной зоне.

Коэффициент влияния (рис. 1–4) технологической обработки методами объемного и поверхностного деформирования на долговечность β для стали 40Х практически одинаков ($\beta_N \approx 10{,}0$), а на ограниченный предел выносливости (β_{RN}) несколько выше при растяжении до 22% по сравнению с ППД (1,54 против 1,15).

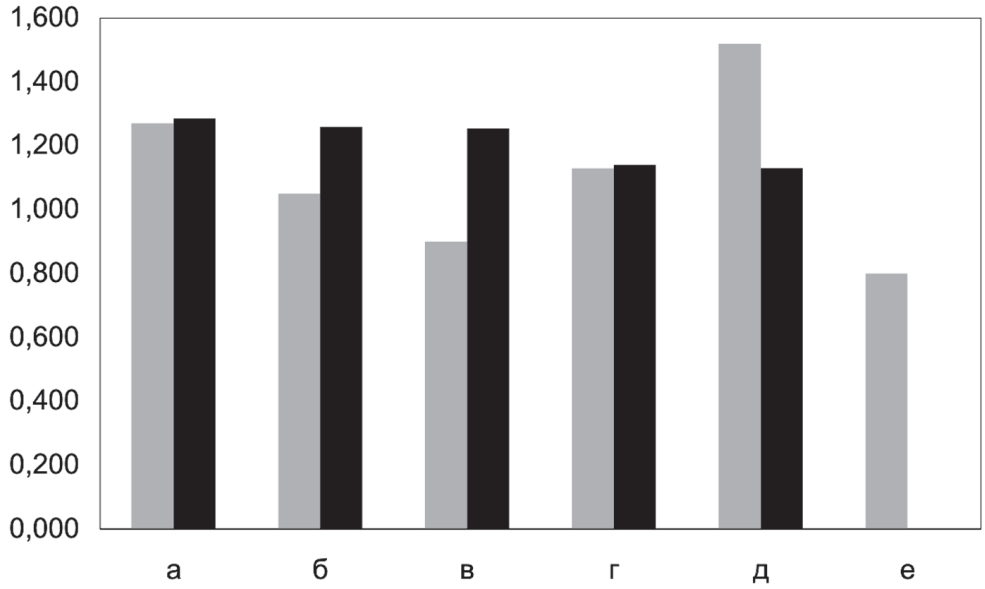

Рис. 1. Диаграммы изменения коэффициента влияния технологической обработки (▒ – объемная деформация: ■ – ППД) на ограниченный предел выносливости сталей на воздухе (σ_{RNT}/σ_{RN}):
а, б – 12Х18Н10Т; в – 08 кп; г – 08ГСЮТ; д – 40Х; е – 35ХГСА

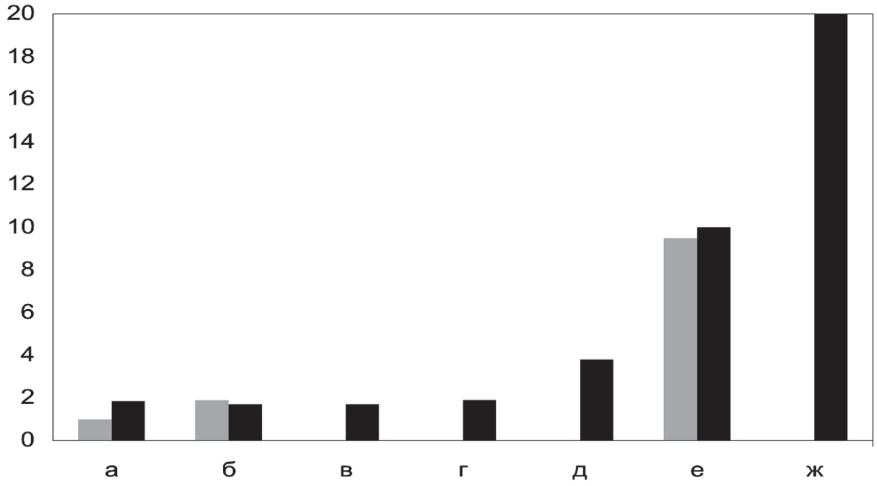

Рис. 2. Диаграммы изменения коэффициента влияния технологической обработки
(■ – объемная деформация; ■ – ППД) на циклическую долговечность сталей на воздухе (N_T/N):
а – 08кп; б – 08ГСЮТ; в – 35ХГСА; г – 20ХН2М; д – 35ХГСНА; е – 40Х; ж – 12Х18Н10Т

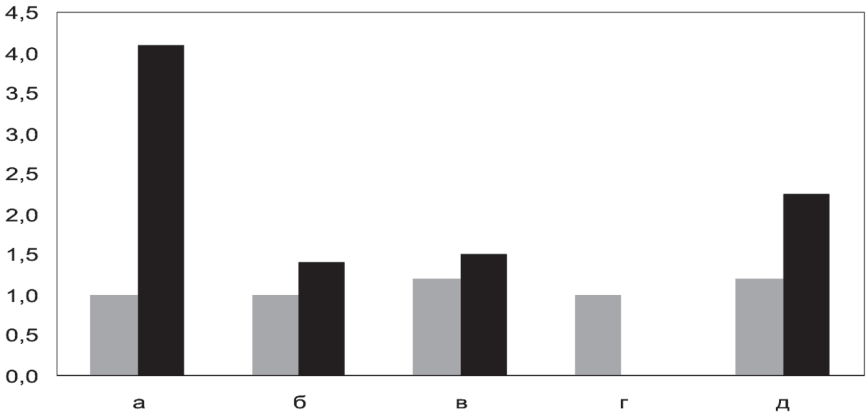

Рис. 3. Диаграммы изменения коэффициента влияния технологической обработки
(■ – объемная деформация; ■ – ППД) на ограниченный предел
выносливости сталей в коррозионной среде ($\sigma R_{cm}/\sigma R_c$):
а – 40Х; б – 08кп; в – 08ГСЮТ; г – 35ХГСА [21]; д – 12Х18Н10Т

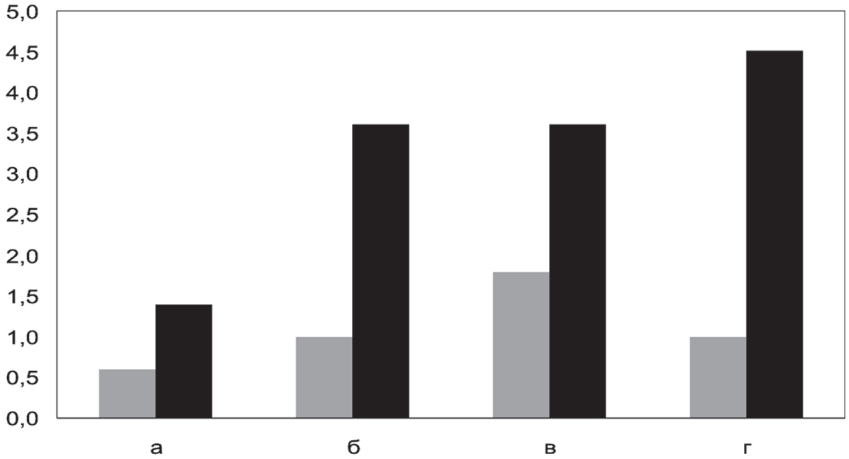

Рис. 4. Диаграммы изменения коэффициента влияния технологической обработки
(■ – объемная деформация; ■ – ППД) на циклическую долговечность
сталей в коррозионной среде (NT_c/N_c):
а – 12Х18Н10Т; б – 08кп; в – 08ГСЮТ; г – 40Х

Однако при испытании стали 40Х в 3%-ном водном растворе морской соли коэффициенты $\beta_{Nc} \approx 250$ и $\beta_{RNc} \approx 4$, после ППД фрикционно-упрочняющая обработка (ФРУО; обкатка роликами), намного больше, чем после растяжения до 22%, при которой эти коэффициенты незначительно превышают 1.

Осадка до 5-17% холоднокатаной стали 08кп ограниченный предел выносливости и циклическую долговечность на воздухе незначительно (до 3%) снижает, а в коррозионной среде практически не изменяет. Дробеструйная обработка приводит к повышению долговечности сварных соединений из стали 08кп на воздухе в 1,6 раза, а в коррозионной среде – в 3,25 раза. При этом β_{RNc} составляет 1,41.

У малолегированной стали 08ГСЮТ после осадки $\beta_N = 1{,}92$, несколько выше, чем после обдувки сварных соединений ($\beta_N = 1{,}50$). В коррозионной среде циклическая долговечность сварных соединений из этой стали после ППД увеличивается в 3,6 раза, в то время как после осадки до 17% образцов без сварки только в 1,85 раза, а коэффициент $\beta_{RNc} = 1{,}50$ и 1,18 соответственно.

Коррозионная среда значительно понижает малоцикловую усталость листовых сталей 08кп и 08ГСЮТ и их сварных соединений, причем в большей степени она воздействует на сварные соединения из стали 08ГСЮТ. С увеличением амплитуды циклического нагружения влияние среды ослабевает. Долговечность образцов со сварным швом из стали 08кп в морской воде при амплитуде относительной деформации $\varepsilon = 0{,}5\%$ почти в 2 раза выше, чем долговечность образцов из стали 08ГСЮТ.

Снижение сопротивления коррозионной усталости сварных соединений вызвано, в основном, растягивающими остаточными напряжениями, возникающими в зоне термического влияния, где и происходит зарождение усталостной трещины.

Для сталей 08кп и 08ГСЮТ установлено, что из всех исследованных режимов наиболее оптимальным является обдувка дробью длительностью 120 с, приводящая к появлению в поверхностных слоях на глубине до 300…400 мкм остаточных напряжений сжатия величиной ~ 1,5 ГПа. Такая ППД повышает долговечность сварных соединений стали 08кп ($\varepsilon = 0{,}25\%$) в коррозионной среде в 3,3 раза, а стали 08ГСЮТ в 3,6 раза. Однако, несмотря на то, что коэффициент технологической обрабатки сварных соединений у стали 08кп несколько ниже, чем у стали 08ГСЮТ, сопротивление их усталости на воздухе и в морской воде остается все же в 1,19 и 1,25 раза выше ($1{,}31 \cdot 10^5$ против $1{,}10 \cdot 10^5$ циклов на воздухе и $1{,}26 \cdot 10^5$ против $1{,}01 \cdot 10^5$ циклов при $\varepsilon = 0{,}25\%$) соответственно.

Дробеструйная обработка после правки закаленной с высоким отпуском стали 35ХГСА обусловливает повышение долговечности на воздухе в 1,49 раза. Растяжение до 2,6 и 5,3% снижает ограниченный предел выносливости стали на воздухе.

Обкатывание роликами стали 35ХГСНА и дробеструйная обработка правленых образцов после цементации и закалки с низким отпуском стали 20ХН2М также повышают β_N до 3,31 и 1,84 соответственно.

Таким образом, анализ оригинальных и литературных данных позволяет сделать вывод о большем влиянии на повышение сопротивления усталостному разрушению металлических материалов на воздухе и в коррозионной среде методом поверхностного пластического деформирования по сравнению с объемным деформированием. Это подтверждается данными, представленными на рис. 5.

При этом наиболее существенное улучшение сопротивления усталостному и коррозионно-усталостному разрушению металлических материалов наблюдается после комбинированных методов ППД.

ППД повышает циклическую долговечность при всех значениях показателя упрочнения материалов. Этот эффект более существенен для материалов с более высоким значением А.

Установленная зависимость $N_{ппд}/N$ от показателя А упрочнения при статическом растяжении металлических материалов в термообработанном состоянии позволяет прогнозировать эффективность введения операции ППД с целью повышения долговечности материалов при циклическом нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пачурин Г.В. Повышение коррозионной долговечности и эксплуатационной надежности изделий из деформационно-упрочненных металлических материалов. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 132 с.

2. Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий: учеб. пособие / Г.В. Пачурин, [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ, 2006.

3. Коррозионная усталость конструкционных сталей и их сварных соединений в морской воде / М.Ф. Бережницкая [и др.] // ФХММ. – 1993. – Т. 29, № 1. – С.129-131.

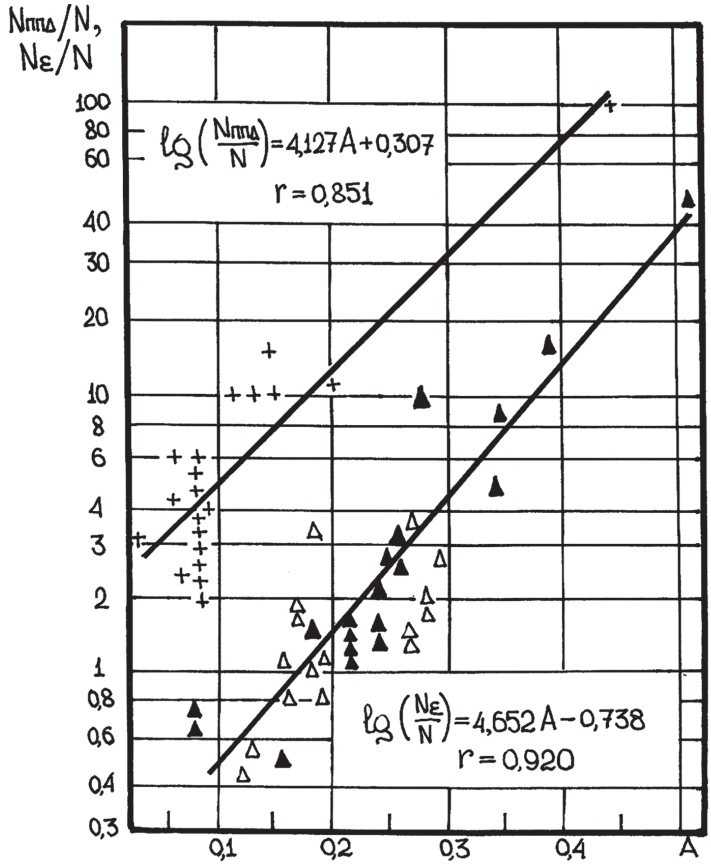

Рис. 5. Зависимость воздействия предварительной пластической обработки (объёмной – Δ, ▲ и поверхностной – +) на изменение долговечности материалов при $\sigma_a = 0{,}5\sigma_в$ от показателя деформационного упрочнения А в исходном состоянии (▲ – по литературным данным)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УПРОЧНЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Пачурин Г.В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, Россия

THEORETICAL BASES INCREASE CORROSION RELIABILITY HARDENING OF METALS AND ALLOYS

Pachurin GV

Nizhny Novgorod State Technical University RE Alekseeva, N. Novgorod, Russia

Известно, что эксплуатационные характеристики деталей машин и механизмов определяются в основном свойствами поверхностных слоев металла, поскольку все процессы разрушения, особенно при циклическом нагружении начинаются, как правило, с поверхности и зависят от ее строения и физико-химического состояния. Роль характера несовершенств поверхности металла существенно возрастает при коррозионной усталости, так как она определяется образованием защитных барьерных пленок, понижающих скорость коррозии при отсутствии напряжений и непрерывно разрушающихся при циклическом нагружении, а также концентрацией напряжений, вызываемой повреждением поверхности, возникновением на ней коррозионных каверн.

При этом интенсивное ветвление или затупление коррозионно-усталостных трещин, строго говоря, делает неправомерным оценку напряженного состояния в вершине трещины с помощью обычных подходов линейной механики разрушения.

Интенсивность взаимодействия металлов с внешними средами в процессе эксплуатации изделий в значительной мере обусловливается образующимися на поверхности адсорбционными слоями и оксидными пленками, оказывающими защитное пассивирующее действие. В настоящее время нет единой концепции природы пас-