

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ

Ю.Д. Шаповалова, к.т.н., доцент, Курская государственная сельскохозяйственная академия
Т.И. Романова, Курская государственная сельскохозяйственная академия

Приведены сравнительные результаты влияния режимов нитроцементации в пастообразном азотисто-углеродном карбюризаторе на циклическую трещиностойкость хромистых сталей

Ключевые слова: нитроцементация, пастообразный карбюризатор, циклическая трещиностойкость

Наиболее прогрессивным и рациональным способом поверхностного упрочнения хромистых сталей может быть признана нитроцементация с использованием пастообразного азотисто-углеродного карбюризатора [1]. Этот процесс отличается высокой скоростью насыщения поверхности азотом и углеродом, высокой технологической универсальностью, позволяющей проводить обработку сталей в широком диапазоне температур (от 500 до 1000⁰С), варьируя процесс практически от чистого азотирования до чистой цементации. От длительности и температуры обработки стали зависит глубина нитроцементованного слоя, степень его насыщения азотом и углеродом, комплекс механических свойств.

Влияние нитроцементации сталей в пастах на их усталостные свойства не исследовалось раньше. В литературе имеются весьма противоречивые сведения о влиянии содержания угле-

рода в цементованных и нитроцементованных хромистых сталях на циклическую прочность[2,3].

Целью настоящей работы является исследование влияния режимов нитроцементации на трещиностойкость хромистых сталей.

Для исследования выбраны среднеуглеродистые хромистые стали, которые широко используются в машиностроении для изготовления деталей, работающих в условиях циклического нагружения (валов, осей, шатунов и т.п.). Исследовались стали 30Х и 30Х13. Первая - с минимальным содержанием хрома (~ 1%), обеспечивающим поверхностному слою преимущественно мартенситную структуру, вторая - с максимальным содержанием хрома (~ 13%), ограничивающим область существования γ – фазы на диаграмме состояния Fe – Cr. Химический состав исследуемых сталей представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Сталь	Содержание элементов				
	C	Si	Mn	Cr	P;S
30Х	0,26	0,21	0,57	0,94	< 0,035
30Х13	0,28	0,48	0,62	12,8	< 0,035

В работе [1] предложен карбюризатор, в состав которого входят следующие компоненты:

- карбамид (NH₂)₂СО – 15%;
- железосинеродистый калий K₄Fe(CN)₆ – 15%;
- углекислый барий BaСО₃ – 15%;
- сажа газовая (аморфный углерод) – 55%.

Смесь компонентов разводится карбометилцеллюлозным клеем (КМЦ) и наносится на упрочняемую поверхность. Для экспериментальной проверки эффективности карбюризатора нитроцементацию образцов из сталей 30Х и 30Х13 проводили в широком диапазоне температур от 500 до 900⁰С. Образцы покрывали пастой, высушивали и упаковывали в контейнер с наполнителем в виде чугунной стружки. Нагрев контейнера с образцами производили в шахтной лаборатор-

ной печи СШОЛ – 12–МЗ–Ц4. Длительность нитроцементации – 2ч. После нитроцементации образцы охлаждали в контейнере, распаковывали и делали микрошлифы, на которых измеряли с помощью окуляра – микрометра глубину диффузионного слоя и фотографировали микроструктуру. Результаты нитроцементации сталей 30Х и 30Х13 получились различными. На низколегированной стали 30Х при низких температурах насыщения (500...700⁰С) образовались диффузионные слои, состоящие из двух четко различающихся зон (карбонитридной корки и переходной зоны), при более высоких температурах нитроцементации диффузионные слои имеют большую глубину и содержат большое количество изолированных карбидных включений (рис.1).

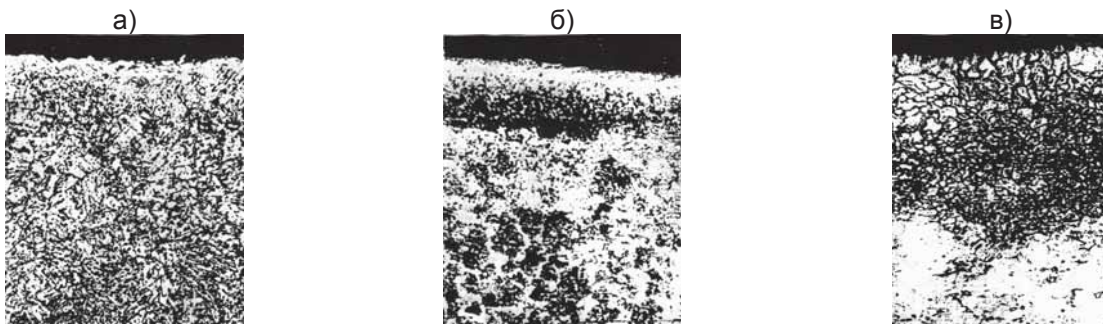


Рис. 1. Микроструктуры стали 30X нитроцементованной при температурах: а) 500°C; б) 600°C (x200); в) 800°C (x300).

На высокохромистой стали 30X13 диффузионные слои заметной величины образовались только при температурах насыщения выше 750°C. Диффузионные слои на этой стали, также, как и при низкотемпературной нитроцементации

стали 30X, состоят из двух зон (тонкой карбидной корки на поверхности и глубокой эвтектоидной зоны с большим количеством мелких изолированных карбидов) (рис. 2).



Рис. 2. Микроструктуры стали 30X13 нитроцементованной при температурах: а) 800°C; б) 900°C (x300)

Наибольший интерес для повышения усталостной прочности представляет низкотемпературная нитроцементация. На рисунке 3 пред-

ставлены зависимости глубины диффузионных слоёв от температуры и длительности нитроцементации стали 30X.

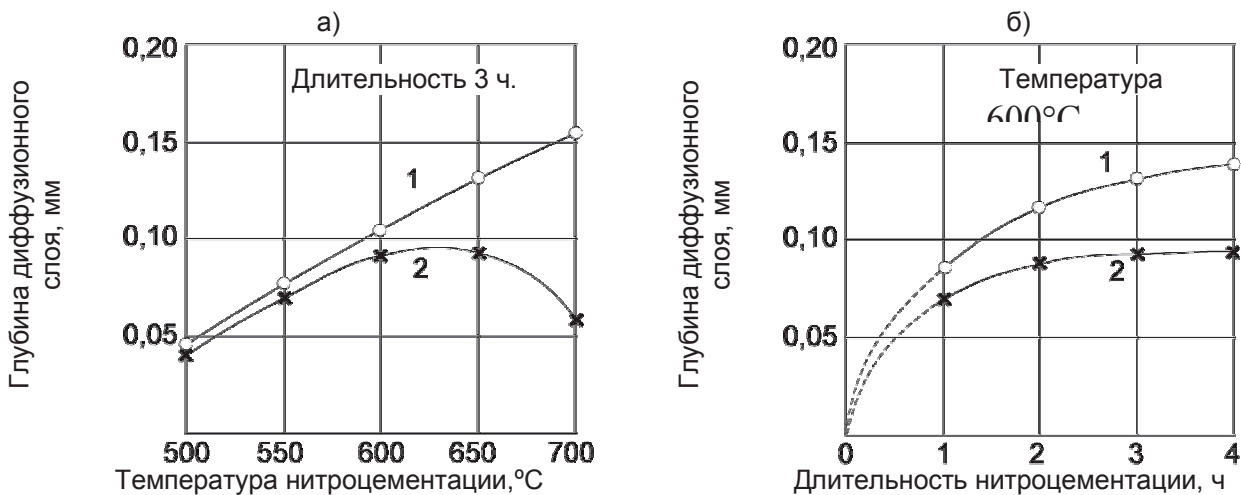


Рис.3. Зависимости глубины диффузионного слоя стали 30X от температуры (а) и длительности (б) низкотемпературной нитроцементации: 1-общая глубина диффузионного слоя; 2 – глубина карбонитридной зоны

Как видно из приведенных рисунков, повышение температуры нитроцементации от 500°C

до 700°C приводит к практически линейному повышению общей глубины диффузионного

слоя. Глубина карбонитридной зоны имеет экстремум при температурах 600°C ... 650°C. Повышение температуры нитроцементации стали 30X приводит к интенсивному снижению глубины карбонитридной зоны.

Нитроцементация высокохромистой нержавеющей стали 30X13 даже при высоких температурах происходит гораздо менее интенсивно, чем стали 30X, что объясняется высоким сродством хрома к углероду. На поверхности слоёв стали 30X13 образуются карбидосодержащие слои в виде мелкодисперсных включений [(Fe/Cr)₃(CN)] в металлической матрице. Содержание таких частиц достигает 80...90% объёма слоя. Карбидные включения значительно снижают скорость диффузии углерода в поверхностном слое стали и уменьшают общую глубину нитроцементации.

Для установления влияния режимов нитроцементации на усталостные свойства сталей было исследовано по 20 образцов сталей 30X и 30X13 в нормализованном состоянии (в состоянии поставки).

Цилиндрические образцы диаметром $d = 8$ мм длиной $l = 180$ мм с галтелью в средней части минимальным диаметром 5 мм испытывались на чистый изгиб с вращением неразрушающим методом [4]. Суть метода в том, что испытуемый образец помещается в магнитное поле вихретокового датчика и нагружается ступенчато возрастающим напряжением σ на базе 10^3 циклов на ступень. После циклирования образец разгружается, измеряется амплитуда высшей гармоники (ВГ) ЭДС измерительной обмотки датчика. Если напряжение цикла σ меньше предела выносливости, то амплитуда ВГ не меняется. При достижении напряжения цикла σ , равном пределу выносливости σ_{-1} (коэффициент асимметрии цикла $R = -1$), наблюдается скачок амплитуды ВГ ЭДС датчика. Погрешность измерения σ_{-1} составляет $\pm \Delta\sigma / 2$, где $\Delta\sigma$ – приращение (ступень) напряжения. После измерения σ_{-1} образец не повреждён и может быть использован для дальнейших исследований, например, для определения предела текучести $\sigma_{0,2}$. Результаты испытаний образцов сталей в нормализованном (исходном) состоянии дали среднее значение предела выносливости стали 30X, равным $\sigma_{-1} = 291$ МПа. Предел выносливости высокохромистой стали 30X13 в том же состоянии $\sigma_{-1} = 393$ МПа, что в 1,35 раза выше, чем у стали 30X с минимальным содержанием хрома.

После определения предела выносливости образцов обеих сталей в нормализованном состоянии была проведена нитроцементация этих образцов в карбюризаторе, состав которого приведен ранее.

Нитроцементация проводилась по разным режимам (высокотемпературная и низкотемпературная), на каждый режим обработки принимали по три образца каждой стали. Нитроцементован-

ные образцы подвергали испытаниям для определения σ_{-1} и $\sigma_{0,2}$.

Исследования показали, что низкотемпературная нитроцементация (650°C), проводимая после закалки и, в некотором смысле, заменяющая высокий отпуск, привела к заметному повышению предела выносливости. Особенно заметно это повышение при длительности нитроцементации 3ч и выше - при этих режимах обработки повышение предела выносливости получено почти в полтора раза по сравнению с исходным состоянием ($\sigma_{-1} = 322$ МПа в исходном состоянии и $\sigma_{-1} = 460$ МПа после обработки). Химико-термическая обработка нержавеющей стали 30X13 дала прямо противоположные результаты. Высокотемпературные режимы обработки и особенно низкотемпературные режимы не обеспечили роста значений σ_{-1} против исходного состояния (нормализованной) стали.

Полученные результаты позволили исследовать влияние нитроцементации на циклическую трещиностойкость (оценку работоспособности материала с трещиной) сталей. Критериями локального разрушения в рамках линейной механики являются K_{1C} , характеризующий точку перехода от локального разрушения к глобальному неустойчивому, и ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжения.

Соотношение, связывающее скорость роста трещины dl/dN и ΔK даётся уравнением Париса [5].

$$dl/dN = B(\Delta K)^n$$

В данном случае постоянные B и A выступают как размерные постоянные, одна из которых (B) имеет размерность скорости, а вторая (A) – коэффициента интенсивности напряжений. Параметр n является структурно-чувствительным, характеризующим чувствительность металла к трещине. Он связан с пороговыми значениями, отвечающими смене микромеханизма разрушения в точках неустойчивости системы. Связь K_{1C}

с n можно выразить как $K_{1C} = K_{1C}^{\max} \left[\frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - 2} \right]$,

где $K_{1C}^{\max} = 121 \text{ МПа} \sqrt{\text{М}}$ для стали с $n = 2$; $n_{\max} = 6$

Однако определение K_{1C} по параметру n задача экспериментально трудоёмкая, т. к. требуются специальные машины и большая длительность испытаний крупногабаритных образцов. Поэтому всегда стояла задача отыскания более простого способа определения K_{1C} и параметров кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). На рис. 4 представлен схематический вид КДУР.

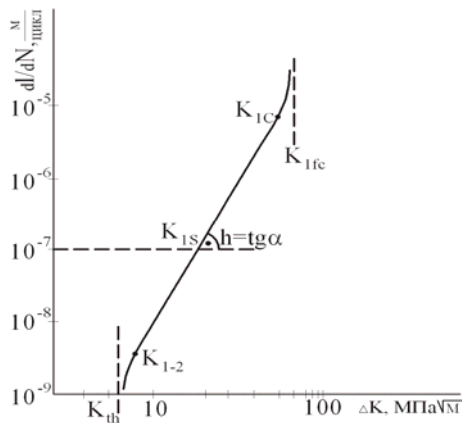


Рис.4. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения (схема)

На КДУР выделяют две основные характеристики циклической трещиностойкости: ΔK_{th} - пороговый размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН), ниже которого усталостная трещина не распространяется, и ΔK_{IIC} - при котором происходит автомодельное усталостное разрушение образца. Исследования [6,7] привели к установлению соотношений для определе-

ния K_{1C} по отношению предела выносливости $\sigma_{0,1}$ к пределу текучести $\sigma_{0,2}$. Ниже приводятся расчётные формулы для стали.

$$K_{1C} = 40,3 \left[\frac{\sigma_{-1} / \sigma_{0,2}}{0,11 + 0,26(\sigma_{-1} / \sigma_{0,2})} \right]$$

при $0,3 \leq \sigma_{-1} / \sigma_{0,2} \leq 0,5$

$$K_{1C} = 40,3 \left[\frac{\sigma_{-1} / \sigma_{0,2}}{\sigma_{-1} / \sigma_{0,2} - 0,23} \right]$$

при $0,5 \leq \sigma_{-1} / \sigma_{0,2} \leq 0,7 - 0,8$

По K_{1C} рассчитываются параметры КДУР из соотношений

$$\Delta K_{th} = K_{1C} \cdot \Delta; \quad \Delta K_{IS} = K_{1C} \cdot \Delta^{1/2}; \quad \Delta K_{IIC} = K_{1C} \cdot \Delta^{-1/8}$$

где $\Delta=0,11$ (для сталей) – постоянная разрушения

По приведенным соотношениям рассчитаны параметры КДУР исследованных сталей до и после нитроцементации. Данные приведены в таблице 2

Таблица 2

Характеристики КДУР хромистых сталей.

Сталь	состояние	K_{1C} , МПа \sqrt{M}	n	K_{th} МПа \sqrt{M}	K_{IS} МПа \sqrt{M}	K_{IIC} МПа \sqrt{M}
30X	исходное	62,3	3,48	7,3	22,8	71,8
	нитроцементация	67,4	3,46	8,4	25,3	76,9
30X13	исходное	64,5	3,36	7,8	24,6	74,5
	нитроцементация	74,6	3,17	9,4	28,3	85,6

Полученные результаты позволили построить КДУР, характеризующие трещиностойкость сталей после нитроцементации.

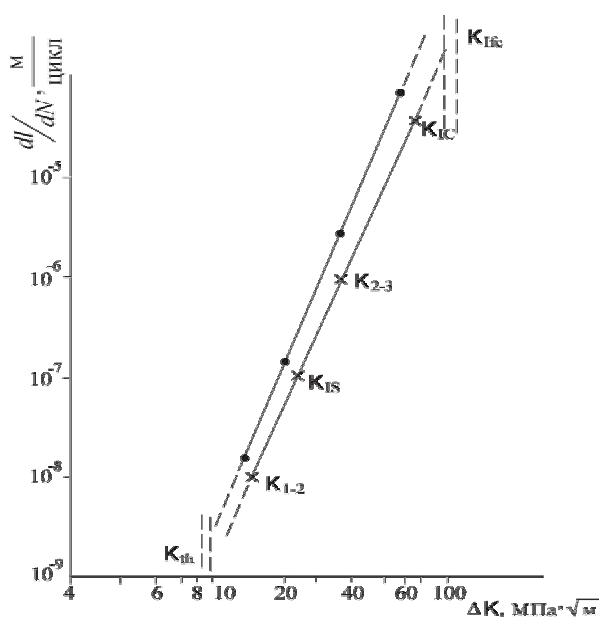


Рис. 5. КДУР стали 30X (- -) и стали 30X13(-х-)

На рис.5 приведены эти кривые для нитроцементованных сталей. Видно, что сталь 30X13 имеет несколько более высокую трещиностойкость, т.к. параметр n для неё меньше, чем для стали 30X. Если учесть, что K_{IS} характеризует переход от квазиупругого роста трещины к упруго-пластическому, то из сравнения кривых следует, что сталь 30X13 имеет большее сопротивление росту усталостной трещины (меньшая скорость роста). Нитроцементованная сталь 30X13 имеет весьма высокую трещиностойкость ($K_{1C} = 74,6$ МПа $\cdot\sqrt{M}$), что связано с благоприятной структурой диффузионных слоёв, имеющих большую глубину и плавно переходящих в сердцевину. Нитроцементованная сталь 30X имеет несколько меньшее значение K_{1C} , что объясняется наличием на поверхности диффузионного слоя сплошной карбонитридной корки, облегчающей зарождение усталостных трещин. Распределение элементов по сечению диффузионного слоя стали 30X, нитроцементованной по режиму 650⁰, 3 часа, показывает, что процесс насыщения сдвинут в область цементации, однако небольшое количество азота (до 0,1%) проникает глубоко под поверхностный слой стали. По-

вышенное содержание углерода прослеживается до глубины порядка 250 мкм, а азота до глубины более 1 мм, что влияет на скорость прорастания трещины.

Результаты исследований позволили сделать выводы, на основании которых можно рекомендовать режим нитроцементации хромистых сталей, обеспечивающих наилучшее сочетание механических свойств с учётом показателей ус-

талости. Для гладких образцов (оси валы) следует использовать сталь 30X, имеющую высокий предел выносливости после нитроцементации ($\sigma_{-1}=460$ МПа). Для деталей с концентратором напряжений (выточки, резьбовые соединения) предпочтительно использовать сталь 30X13, имеющую наибольшее сопротивление росту трещины.

Список использованной литературы:

1. Лахтин Ю.М., Кочан Я.Д. //Сб. Прогрессивные методы термической обработки. – М.: Машиностроение, 1972. С.111-116.
2. Хорошайлов В.Г. Тюлихнданов Е.Л. Химико-термическая обработка стали – Л.: ЛПИ. 1980. – 78 с.
3. Ткачёв В.Н. Фиштейн Б.М. Усталостные свойства цементованных сталей 20X и 40X// Сб. Методы повышения долговечности деталей машин. – М.: Машиностроение, 1971. С.171-174.
4. Якиревич Д.И., Иванова В.С., Ефименко Л.А. Способ определения механических характеристик металлов – А.С.№1632156СССР №27/90, 1989, Бюл. №14 – 3с.
5. Ярема С.Я. О корреляции параметров уравнения Париса и характеристик циклической трещиностойкости материалов // Проблемы прочности. 1981. С. 20-28.
6. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний. Метод определения трещиностойкости сталей по отношению предела усталости к пределу текучести // Методические рекомендации ИМЕТ АН СССР. – М.:, 1984. – 29 с.
7. Иванова В.С., Бозрова Л.К., Зотов А.Д. О связи K_{1C} с пределом усталости. // Зав. лаб. № 10. 1986. С. 65-68.

Наведено порівняльні результати впливу режимів нитроцементації в пастоподібному азотистовуглецевому карбюризаторі на циклічну тріщиностійкість хромистих сталей

Ключові слова: нитроцементація, пастоподібний карбюризатор, циклічна тріщиностійкість

Comparative results on the effect of nitriding a paste hydrazoic carbon carburizer the cyclic crack resistance of chromium steels

Keywords: carbonitriding, pasty carburizer, cyclic crack-resistanc

Дата надходження в редакцію: 01.06.2012 р.

Рецензент: д.т.н., професор Кочмола М.М.

УДК 621.785.796:669.017

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ПОМОЩЬЮ ТЕРМООБРАБОТКИ

О.В. Летова, Курская государственная сельскохозяйственная академия

Э.Ю. Медведев, доцент, Курская государственная сельскохозяйственная академия

И.В. Ярыгина, доцент, Курская государственная сельскохозяйственная академия

Исследовано влияние отпуска, длительности и температуры закалки на твердость графитизированных слоев среднеуглеродистой конструкционной стали 40 после двухступенчатой нитроцементации в активной пасте.

Ключевые слова: графитизация, закалка, нитроцементация, отпуск, сталь.

В литературе недостаточно широко освещен вопрос по влиянию закалки и других видов упрочняющей обработки на поведение сталей с поверхностными графитизированными слоями, поэтому представляется необходимым исследование этого вопроса.

Структура диффузионного слоя стали 40, полученная в результате ее нитроцементации состоит в основном из феррита, в котором равномерно распределены включения графита различной величины и формы [1]. Как показывает

рентгеноструктурный анализ карбидная фаза в такой структуре практически отсутствует. Следы цементита обнаруживаются только в слоях, содержащих до 1 % графита.

Для закалки графитизированных слоев необходимо, чтобы часть углерода из свободного состояния (графита) перешла бы в связанное состояние (твердый раствор), однако для этого необходима высокая температура и большая длительность нагрева под закалку. Дело в том, что графит растворяется в железе значительно