

# ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ЭКОНОМНО-ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЗОТИРОВАННОГО СЛОЯ

Белоусов Н.Н., Варюхин В.Н.

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк,  
e-mail: [bilniknik52@gmail.com](mailto:bilniknik52@gmail.com)

**Актуальность.** Азотирование является одним из наиболее эффективных методов химико-термической обработки (ХТО) и поверхностного упрочнения экономно-легированных сталей (ЭЛС). Особое место среди ЭЛС занимают высокоазотистые стали (ВАС), получаемые в результате объемного азотирования с частичной заменой атомами азота дорогостоящих элементов, в первую очередь, никеля и марганца. Несмотря на широкое применение различных технологий ХТО остаются нерешенными вопросы, связанные с: интенсификацией процессов поверхностного структурообразования; формированием заданной толщины и качества диффузионного слоя; поверхностным упрочнением, а также соотношением между поверхностным и объемным упрочнением ВАС. При интенсификации процессов формирования поверхностных ХТО-структур открываются новые возможности управления свойствами объемно азотированных сталей.

**Цель работы.** Исследовать возможность интенсификации процессов формирования поверхностных ХТО-структур экспериментальных составов ВАС типа Х18АГ10Н16, Х19АГ10С2, Х13АГ20Н6Ф и Х14АМСФ путем деформационной активации поверхности образцов в температурно-вакуумной камере (ТВК) машины ИМАШ20-75 (АЛА-ТОО).

**Материал и методы исследований.** В качестве основного материала исследований выбрана ВАС типа Х18АГ10Н16 (объемная концентрация азота  $C_N = 0.06, 0.3, 0.5$  и  $1.1\%N$ ). Для сравнения использованы стали типа Х19АГ10С2 ( $C_N = 0.4\%N$ ), Х13АГ20Н6Ф ( $C_N = 1.2\%N$ ) и Х14АМСФ ( $C_N = 1.1\%N$ ). Для экспериментов по азотированию изготовлены стандартные образцы с необходимой шероховатостью поверхности и нанесением отпечатков (на ПМТ-3). На рис. 1 (а) приведены форма и размеры ХТО-образцов, которые применялись в ТВК машины ИМАШ20-75 (АЛА-ТОО) для: осуществления процессов ХТО; проведения деформационной активации поверхности; выполнения механических испытаний на разрыв. Изучение процессов *in situ* азотирования и кинетики формирования поверхностных структур проводились непосредственно в процессе ХТО с помощью высокотемпературного длиннофокусного микроскопа МВТ-71У4.2 (увеличение  $100\times$  и  $500\times$ ). На рис. 1 (б) показаны начальные стадии *in situ* азотирования деформационно-активированной поверхности стали Х18АГ10Н16 ( $C_N = 0.5\%N$ ) после вакуумного травления ( $T = 1250^\circ C$ ,  $P = 10^{-5}$  мм Hg,  $t = 20$  мин).

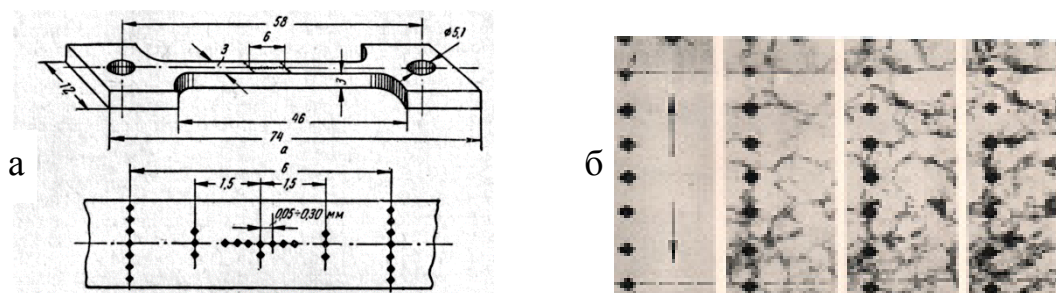


Рисунок 1 - Форма и размеры образцов ВАС (а); начальные стадии *in situ* азотирования:  $T_{аз} = 520^\circ C$ , время  $t_{аз} = 0, 10, 20$  и  $30$  мин соответственно (б)

Интенсификация процессов формирования поверхностных ХТО-структур осуществлялась в условиях пиролиза карбамида и диссоциации аммиака ( $T = 520^\circ\text{C}$ ,  $t = 2 \div 6$  ч) и деформационной активации поверхности образцов ВАС ( $\Delta\sigma = 0 \pm 200$  Н/м<sup>2</sup>).

Расчет характеристик прочности и пластичности ХТО-образцов проводили в соответствии с ГОСТ 1497-84. Ударную вязкость определяли на образцах с U-образным надрезом (согласно ГОСТ 9454-78). Износостойкость ХТО-образцов определяли на машине 2168-УНЦ в условиях сухого трения. Износ оценивали (согласно ГОСТ 27860-88) по методу отпечатков от алмазного индентора. Испытания проводили при комнатной температуре, скорость скольжения  $V = 1$  м/с, путь трения  $S = 500$  м, осевые нагрузки  $P = 20 \div 100$  Н. Величину износа вычисляли по формуле:  $I = 0.125 \cdot (L^2 - l^2) / r$ , где  $I$  - износ (увеличение ширины отпечатков), мм;  $L$  - ширина отпечатков после испытания;  $l$  - ширина отпечатков до испытаний;  $r = 10$  мм - радиус контртела из стали ШХ15 с твердостью 58 HRC. Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке  $P = 1$  Н (ГОСТ 9450-76). За эффективную толщину азотированного слоя принимали расстояние от поверхности до зоны с микротвердостью  $H_{\mu} = 450$  МПа. Точность определения эффективной толщины слоя составляла  $\Delta h = 2.5$  мкм. Фазовый состав исследуемых сталей определяли методом рентгеноструктурного анализа (Дрон-3, излучение  $\text{Co}$ ). С целью изучения дополнительных возможностей управления поверхностной прочностью ХТО-образцов осуществляли закалку ( $T = 620 \div 740^\circ\text{C}$ ,  $t = 30 \div 60$  мин, среда охлаждения: воздух, масло и вода), или охлаждение с печью (в атмосфере молекулярного азота).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Исходной структурой ВАС перед азотированием является аустенит, что обеспечивает при ХТО получение однородных азотированных слоев без хрупкой нитридной сетки по границам аустенитных зерен. Обнаружено, что поверхностное азотирование ВАС X18AG10H16 ( $C_N = 1.1\%$  N) обеспечивает получение более глубоких диффузионных слоев по сравнению с образцами с меньшей объемной концентрацией азота ( $C_N = 0.06, 0.3\%$  N).

Показано, что увеличение толщины ХТО-слоя приводит к повышению механических свойств ВАС (рис. 2, а). ХТО-обработка ВАС X18AG10H16 ( $C_N > 0.5\%$  N) обладает рядом особенностей: высокой склонностью к деформации и повышенной термической стабильностью (рис. 2, б).

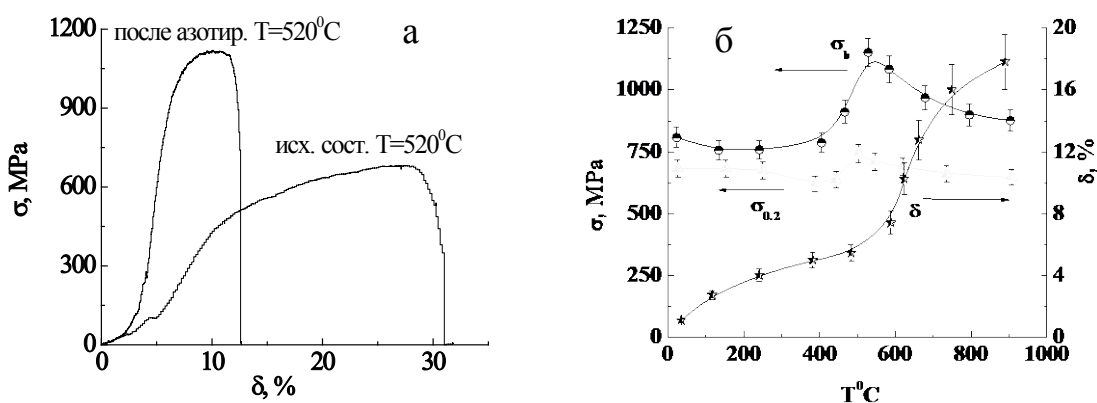


Рисунок 2 - Кривые деформации исходного и азотированного образцов стали X18AG10H16 ( $C_N = 1.1\%$  N) при  $T = 520^\circ\text{C}$  (а); характер изменения механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$  и  $\delta$ ) ХТО-образцов от температуры испытания ( $T = T_K \div 1000^\circ\text{C}$ , б)

По данным РСА ХТО-структура стали X18AG10H16 ( $C_N = 1.1\%$  N) обладает высокой плотностью дислокаций:  $\Omega = (2 \div 5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и достаточно низким уровнем остаточных напряжений. Для получения градиентного поверхностного слоя применяли закалку. Обнаружено, что среда охлаждения (воздух, масло и вода) не оказывала

существенного влияния на характеристики механических свойств данной стали:  $\sigma_T = 1050 \div 1100$  МПа,  $KCU = 0,8 \div 0,9$  МДж/м<sup>2</sup>. После закалки ( $T = 750^\circ\text{C}$ ) микротвердость поверхности снижается с  $H_\mu = 920$  МПа до  $H_\mu = 650$  МПа и увеличивается эффективная толщина азотированного слоя:  $h_{\text{эфф}} = 150$  мкм. Кроме этого, обнаружена разница в характере распределения микротвердости:  $H_\mu$  мало изменяется при удалении от поверхности (до 200 мкм), в зоне до 300 мкм микротвердость начинает увеличиваться, а затем опять снижается. Это обусловлено изменением концентрации азота по сечению ХТО-слоя. Нагрев до  $T = 600^\circ\text{C}$  не приводит к изменению  $H_\mu$ , что свидетельствует о высокой теплостойкости азотированного слоя стали X18AG10N16. Значительные изменения в слое происходят при нагреве до  $T = 650^\circ\text{C}$  и выше. С повышением температуры нагрева наблюдается тенденция к снижению максимальной микротвердости поверхностного слоя. Так, нагрев до  $T = 650^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению микротвердости с  $H_\mu = 920$  МПа до  $H_\mu = 780$  МПа. Нагрев до  $T = 700^\circ\text{C}$  приводит к снижению  $H_\mu$  от 920 МПа до 700 МПа. Закалка от  $T = 750^\circ\text{C}$  снижает  $H_\mu$  до 650 МПа. Разупрочнение азотированного слоя может быть вызвано коагуляцией нитридов, рекристаллизацией азотистой фазы или фазовой перекристаллизацией.

Рентгеноструктурными исследованиями показано, что нагрев до  $T = 600^\circ\text{C}$  не приводит к изменению структуры и фазового состава. Нагрев до  $T = 650^\circ\text{C}$  и охлаждение на воздухе обеспечивает закалку азотированного слоя. Повышение температуры до  $T \geq 700^\circ\text{C}$  способствует увеличению толщины диффузионного слоя и обеспечивает растворение в аустените большего количества нитридов, что приводит к обогащению аустенита азотом и легирующими элементами, а также увеличивает его термическую устойчивость. Принципиальная особенность азотированного слоя ВАС типа X18AG10N16 - отсутствие выделений  $\alpha$ -фазы после закалки на воздухе с различной скоростью охлаждения:  $\Delta T/\Delta t = 50 \div 100^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Последующий отпуск при  $T = 400 \div 450^\circ\text{C}$ ,  $t = 1 \div 2$  ч, по данным рентгеновских исследований, также не приводил к выделению  $\alpha$ -фазы.

**Заключение.** Таким образом, ХТО-азотирование и последующая закалка ВАС типа X18AG10N16 ( $C_N > 0.5\%$  N) позволяют получить высокие значения прочности, пластичности, ударной вязкости объема и износостойкости поверхностного слоя.

Применение методов интенсификации ХТО позволило путем варьирования температурно-временными и газотранспортными режимами обработки, управлять скоростями протекания диффузионных процессов и нитридных выделений, формировать заданные поверхностные структуры, а также управлять физико-механическими свойствами упрочненного слоя ВАС. Их повышение возможно за счет термической обработки после азотирования.

Азотированная сталь после термической обработки способна обеспечить сочетание высоких значений прочности, пластичности, вязкости сердцевины и износостойкости поверхности. Интенсификация ХТО способна повысить микротвердость, контактную выносливость, сопротивление изнашиванию, коррозионную стойкость и расширить возможности функционального применения ВАС.