

**УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ  
ДИФфуЗИОННОМУ УПРОЧНЕНИЮ**

**Е. П. Поздняков, А. В. Рабков**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**Д. В. Куис**

*Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск*

**Т. И. Сидоренко, А. М. Коротцов**

*БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Республика Беларусь*

**С. Н. Лежнев, А. Б. Найзабеков**

*Рудненский индустриальный институт, Казахстан*

Научный руководитель И. Н. Степанкин

*Приведено сравнение ударной вязкости диффузионно-упрочненных образцов из низкоуглеродистых конструкционных сталей 18ХГТ, 20ХН3А и 16CrMnS5. Установлено, что наибольшей ударной вязкостью обладают диффузионно-упрочненные образцы из стали 16CrMnS5. При изменении времени цементации с 8 до 12 часов ударная вязкость стали 16CrMnS5 снижается с 13,8 до 12,9 Дж/см<sup>2</sup>. При проведении нитроцементации ударная вязкость стали 16CrMnS5 возрастает в 2,2–2,8 раза. Диффузионно-упрочненные слои стали 20ХН3А имеют в 1,0–1,4 раза меньшую ударную вязкость, чем аналогичные слои стали 16CrMnS5. Ударная вязкость слоев, сформированных на стали 18ХГТ, в 1,8–3,2 раза меньше, чем аналогичных слоев стали 16CrMnS5.*

**Ключевые слова:** конструкционная сталь, цементация, нитроцементация, ударная вязкость.

С целью повышения износостойкости и контактной выносливости зубчатых колес, шестерен, поршневых пальцев и других ответственных деталей машин, работающих при высоких ударных и динамических нагрузках, применяются методы диффузионного упрочнения поверхностного слоя. Самыми распространенными среди них являются процессы преимущественной имплантации углерода – цементация и нитроцементация. Помимо высокой твердости поверхности необходимо учитывать и способность материала сердцевины противостоять продвижению трещин при ударных нагрузках. Для данных деталей традиционно используются большое количество конструкционных низколегированных сталей – 12ХН3А, 18ХГТ, 20ХН3А, 15Х, 20ХГР и др. В настоящее время на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга БМК» отлажена технология плавки новой марки стали 16CrMnS5 в соответствии с DIN EN 10084, экспортируемой в страны Европейского Союза. Однако на территории Республики Беларусь и стран ближнего зарубежья она не получила широкого распространения, что связано с недостаточной информативностью о ее свойствах.

Целью работы является установление влияния вида и длительности химико-термической обработки на ударную вязкость сталей 16CrMnS5, 20ХН3А и 18ХГТ.

Объектом исследований являлись термодиффузионно-упрочненные слои сталей 16CrMnS5, 20ХН3А и 18ХГТ. Размер образцов  $10 \times 10 \times 55$  мм. Диффузионное насыщение сплавов осуществлялось путем проведения цементации при температуре  $920^\circ\text{C}$  в течение 8-ми и 12-ти часов и нитроцементации при температуре  $860^\circ\text{C}$  в течение 6-ти и 8-ми часов в твердом карбюризаторе. После ХТО проводилась закалка в масле с температуры  $860^\circ\text{C}$  и отпуск при  $200^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. Определение ударной вязкости образцов проводилось на установке для проведения на ударный изгиб echoLAB в соответствии с ГОСТ9454–78. Изучение изломов осуществлялось при помощи сканирующей электронной микроскопии на микроскопе «VEGA II» LSH фирмы TESCAN (Чехия).

На рис. 1 представлены результаты испытаний диффузионно-упрочненных образцов из указанных сталей. Анализ данных показал, что самым высоким показателем ударной вязкости обладает сталь 16CrMnS5, а самым низким сталь 18ХГТ и не зависит от типа и длительности диффузионного насыщения.

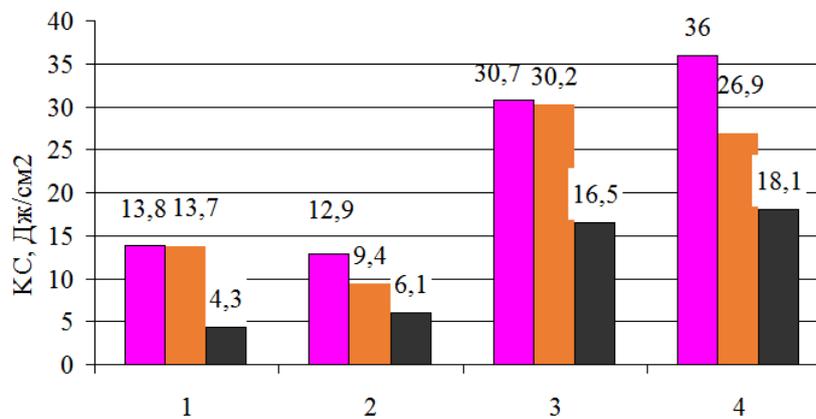


Рис. 1. Ударная вязкость стали 16CrMnS5 (левые столбцы), 20ХН3А (центральные) и 18ХГТ (правые) после термодиффузионного упрочнения: 1 – 8-часовая цементация; 2 – 12-часовая цементация; 3 – 6-часовая нитроцементация; 4 – 8-часовая нитроцементация

Увеличение длительности цементации с 8-ми до 12-ти часов не приводит к значительному изменению ударной вязкости стали 16CrMnS5. После 8-часового науглероживания ее ударная вязкость составила  $13,8 \text{ Дж/см}^2$ , а после 12-часового –  $12,9 \text{ Дж/см}^2$ . Это обусловлено тем, что науглероженные слои имеют близкие параметры значений твердости и ее распределения по всему сечению модифицированных слоев [1].

После испытаний нитроцементованных образцов стали 16CrMnS5 оказалось, что значение ударной вязкости повышается в 2,5 раза по сравнению с цементованными. Это явление обусловлено различной толщиной диффузионных слоев, их морфологией и фазовым составом. Толщина нитроцементованных слоев (рис. 2, *г–е*) примерно в 2 раза меньше, чем цементованных (рис. 2, *а–в*), толщина которых составила около 1 мм [1]. Снижение толщины слоя приводит к увеличению удельной площади сердцевины, которая является более вязкой, чем хрупкая поверхность. Также в структуре нитроцементованных слоев отсутствуют крупные включения (карбиды), которые являются концентраторами повышенных напряжений на меж-

фазной границе «карбид–матрица». При одновременной диффузии углерода и азота в структуре диффузионного слоя формируется большее количество остаточного аустенита, чем при чистом науглероживании [2, 3]. По пластичности аустенит значительно превосходит хрупкую мартенситную матрицу, что позволяет нитроцементованному слою лучше противостоять ударной нагрузке. Также следует отметить, что увеличение длительности нитроцементации повышает ударную вязкость стали – с 30,7 до 36 Дж/см<sup>2</sup>.

Для стали 20ХН3А ударная вязкость образца после 8-часовой цементации и 6-часовой нитроцементации практически соответствует аналогичным слоям, сформированным на стали 16CrMnS5. Однако после увеличения длительности ХТО их ударная вязкость значительно снижается более чем на 25 %.

Диффузионные слои, сформированные на стали 18ХГТ, обладают самыми низкими показателями вязкости – в 1,8–3,2 раза, чем у стали 16CrMnS5. Это, вероятно, связано с изучением морфологии изломов (рис. 2). Определено, что поверхность разрушения образцов стали 18ХГТ имеет мелкозернистое строение с более ровной поверхностью, чем у сталей 16CrMnS5 и 20ХН3А. То есть продвижение трещины при испытании на ударную вязкость в стали 18ХГТ происходит по траектории, которая менее криволинейна, чем у остальных сталей.

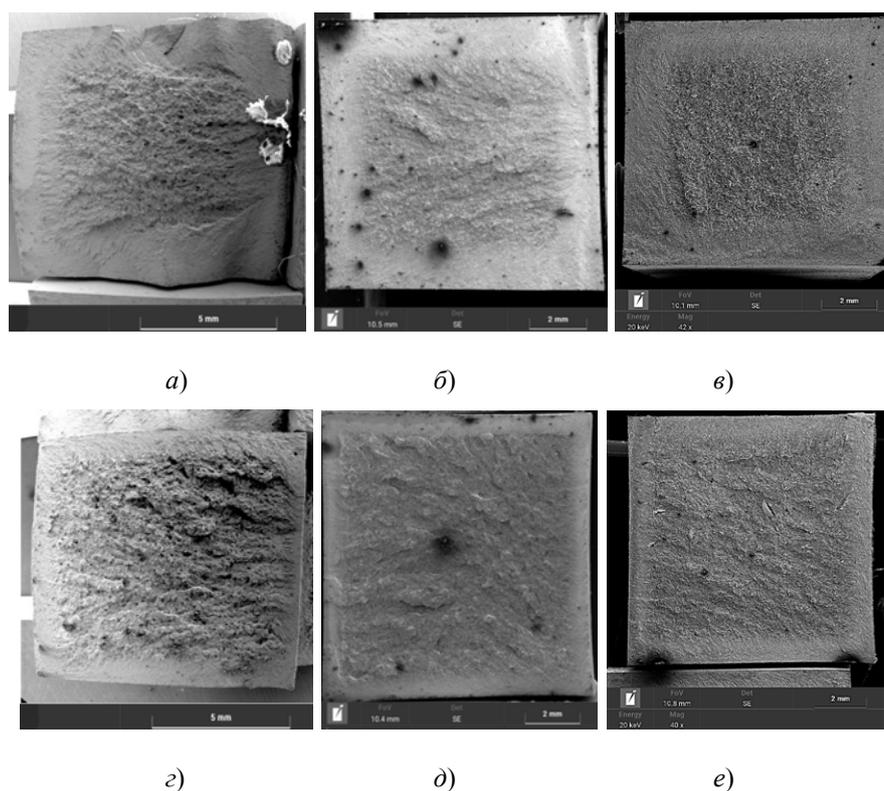


Рис. 2. СЭМ-изображения изломов после проведения испытаний на ударный изгиб диффузионо-упрочненных образцов из стали 16CrMnS5 (а, г), 20ХН3А (б, д) и 18ХГТ (в, е): а–в – 8-часовая цементация; г–е – 6-часовая нитроцементация

Исследовано влияние цементации и нитроцементации на ударную вязкость сталей 16CrMnS5, 20ХН3А и 18ХГТ. Анализ данных позволил сделать следующие выводы:

1. Наибольшей ударной вязкостью обладают диффузионные слои стали 16CrMnS5 в не зависимости от длительности и вида ХТО. После 8-часовой цементации величина ударной вязкости составила 13,8 Дж/см<sup>2</sup>. После увеличения длительности процесса до 12 часов значение незначительно снизилось – до 12,9 Дж/см<sup>2</sup>. В случае проведения нитроцементации ударная вязкость возросла с 30,7 до 36 Дж/см<sup>2</sup> при увеличении времени насыщения.

2. У стали 20ХН3А величина ударной вязкости при проведении 8-часовой цементации и 6-часовой нитроцементации имеет близкие значения к аналогичным слоям стали 16CrMnS5 – 13,7 и 30,2 Дж/см<sup>2</sup> соответственно. Однако после увеличения длительности обоих процессов значение ударной вязкости снижается на 25 %.

3. Значения ударной вязкости всех диффузионных слоев стали 18ХГТ значительно ниже, чем у остальных слоев на сталях 16CrMnS5 и 20ХН3А. Величина ударной вязкости в 1,8–3,2 раза, чем у стали, обладающей наибольшей вязкостью, – 16CrMnS5.

#### Литература

1. Микроструктура и микротвердость термодиффузионно-упрочненных слоев конструкционной стали 16CrMnS5/ И. Н. Степанкин [и др.] // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О.Сухого ; под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 84–88.
2. Gas nitriding and its variations in industrial applications / P. Wach [et al.] // Materials Engineering. – 2008. – Vol. 6. – P. 808–811.
3. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев стали 40X и 35ХГСА / И. Н. Степанкин [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редкол.: А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2019. – С. 104–116.