

Перспективы применения объемно-поверхностной закалки для деталей транспортных средств из сталей пониженной прокаливаемости

А. Э. ЮНИЦКИЙ, М. И. ЦЫРЛИН, канд. техн. наук

ЗАО “Струнные технологии”, г. Минск, Республика Беларусь (m.tsirlin@unitsky.com)

Рассмотрены различные методы закалки деталей машин и механизмов. Дана оценка объемно-поверхностной закалки сталей пониженной прокаливаемости. Исследована структура, определены твердость и ударная вязкость сталей после закалки различных видов. Установлено, что при объемно-поверхностной закалке обеспечивается равномерное распределение твердости от поверхности к основному металлу сталей, а их ударная вязкость выше, чем у сталей, подвергнутых объемной или поверхностной закалке. Метод объемно-поверхностной закалки предложен для широкого внедрения при производстве деталей транспортных средств.

Ключевые слова: термическая обработка; объемная закалка; поверхностная закалка; объемно-поверхностная закалка; стали пониженной прокаливаемости; структура; твердость; ударная вязкость; применение объемно-поверхностной закалки.

ВВЕДЕНИЕ

При производстве и эксплуатации транспортных средств большое внимание уделяется вопросам, связанных с повышением надежности, долговечности, износостойкости изделий, передающих большие крутящие моменты, работающих при действии циклических нагрузок и подвергаемых при эксплуатации интенсивному износу.

Перспективным направлением повышения прочностных характеристик и улучшения эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов является применение новых материалов и технологий термической обработки.

Использование прогрессивных и высокоэффективных методов термической обработки деталей позволяет увеличить прочность, износостойкость и срок их службы. В настоящее время широко используется объемная и поверхностная закалка, однако эти методы имеют существенные недостатки [1 – 3]. Так, после объемной закалки материал приобретает хрупкость из-за наличия мартенсита по всему сечению изделия. Поверхностная закалка обеспечивает высокую твердость деталей на поверхности и низкую — в сердцевине, что придает значительную вязкость материалу при большой износостойкости. Однако резкий переход структур от мартенсита к ферритно-карбидным смесям разной степени дисперсности (троо-

ститу и сорбиту) отрицательно влияет на прочностные свойства деталей.

Перспективным направлением улучшения технологии термической обработки может стать применение объемно-поверхностной закалки с использованием сталей пониженной прокаливаемости (ПП) [4, 5].

Объемно-поверхностная закалка представляет собой термическую обработку, при которой нагрев осуществляется в печи или ТВЧ с последующей изотермической выдержкой, а охлаждение проводится в спреерном устройстве при достаточно высоких скоростях ($v_{\text{охл}} \approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$). Применение описанного метода для ПП-сталей позволит повысить твердость, износостойкость, циклическую долговечность, предел выносливости и обеспечит достаточно вязкую сердцевину деталей. Пониженная прокаливаемость сталей вызвана низким содержанием в них легирующих элементов (менее 0,5 %), выбранной температурой нагрева под закалку (не выше линии мартенситных превращений на 60 – 100 °C) и интенсивным охлаждением [6, 7].

Однако метод объемно-поверхностной закалки недостаточно изучен для широкого практического применения для сталей пониженной прокаливаемости.

Цель настоящей работы — исследование структуры, физических и механических свойств сталей пониженной прокаливаемости, подвергаемых объем-

Таблица 1. Химический состав исследованных сталей

Сталь	Содержание элементов, % (масс.)							
	C	Si	Ni	Cu	Cr	Mn	P	S
60ПП	0,57 – 0,65	0,10 – 0,30	< 0,30	< 0,30	< 0,15	< 0,20	< 0,035	< 0,04
60	0,57 – 0,65	0,17 – 0,37	< 0,30	< 0,30	< 0,25	0,50 – 0,80	< 0,030	< 0,035
40X	0,36 – 0,40	0,17 – 0,37	< 0,30	< 0,30	0,80 – 1,10	0,50 – 0,80	< 0,035	< 0,035

Таблица 2. Термическая обработка сталей

Сталь	Тип закалки	Режим термической обработки
60ПП	Объемно-поверхностная	Нагрев в печи до 840 °С, закалка с использованием спрейерного охлаждения со скоростью 1000 °С/с, отпуск при 200 °С
60	Объемная	Нагрев в печи до 840 °С, закалка в воде со скоростью 350 °С/с, отпуск при 200 °С
40X	Поверхностная	Нагрев ТВЧ до 880 °С, закалка струей воды со скоростью 500 °С/с, отпуск при 200 °С

но-поверхностной закалке, а также оценка возможности их применения для изготовления деталей транспортных средств.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовали образцы из конструкционной углеродистой качественной стали 60ПП пониженной прокаливаемости (ГОСТ 1050–2013) [8, 9]. В сравнительных экспериментах применяли также сталь 60 (ГОСТ 1050–2013) и сталь 40X (ГОСТ 4543–2016). Сталь 60 — конструкционная углеродистая качественная нормальной прокаливаемости, сталь 40X — конструкционная легированная. Химический состав сталей приведен в табл. 1, термическая обработка — в табл. 2 [10].

Исследовали образцы круглого сечения диаметром 15 мм. Структурный анализ проводили визуально и при увеличении × 500.

Определяли твердость по Роквеллу (HRC_3) образцов, закаленных по разным режимам.

Проводили испытания на ударную вязкость образцов размерами 15 × 10 × 10 мм с надрезом глубиной 2 мм и радиусом 1 мм с использованием маятникового копра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам структурного анализа определяли изменение макро- и микроструктуры закаленных образцов по сечению. Установлено, что макрошлиф стали 60ПП после объемно-поверхностной закалки содержит три характерные зоны: *A* — поверхностный упрочненный слой (58 – 62 HRC_3); *B* — переходная область от закаленного слоя к сердцевине (58 – 35 HRC_3); *B* — сердцевина (35 – 32 HRC_3). Макрошлиф стали 40X после поверхностной закалки включает две зоны: *A* — поверхностный упрочненный слой (56 – 58 HRC_3); *B* — сердцевина (28 – 32 HRC_3). На макрошлифе стали 60 после объемной закалки наблюдается только одна зона *A* (52 – 58 HRC_3) (рис. 1).

Микроструктура стали 60ПП после объемно-поверхностной закалки: на поверхности — мартенсит, в более глубоких слоях — троостит, в сердцевине — сорбит. Микроструктура стали 40X после поверхностной закалки — мартенсит, на глубине и в сердцевине — сорбит. Микроструктура стали 60 после объемной закалки: по всему сечению — мартенсит (рис. 2).

Результаты измерения твердости образцов, подвергнутых различной термической обработке, представлены на рис. 3 и 4. Анализ полученных данных

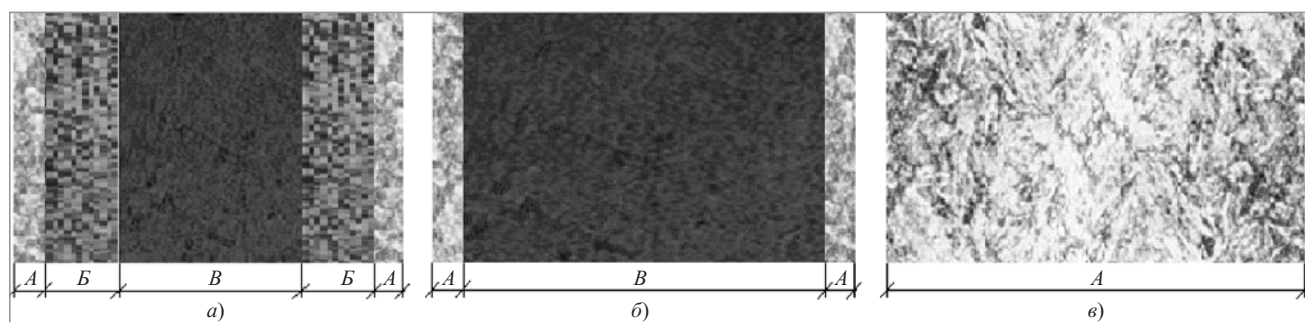


Рис. 1. Макроструктура образцов (продольное сечение по диаметру 15 мм): *a* — сталь 60ПП; *б* — сталь 40X; *в* — сталь 60; *A, B* — слой с различной структурой

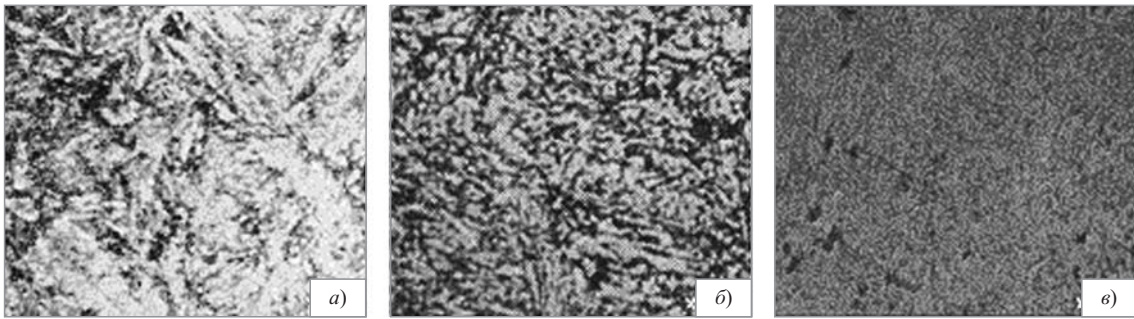


Рис. 2. Типы микроструктур в исследованных сталях:
a — мартенсит; *б* — троостит; *в* — сорбит

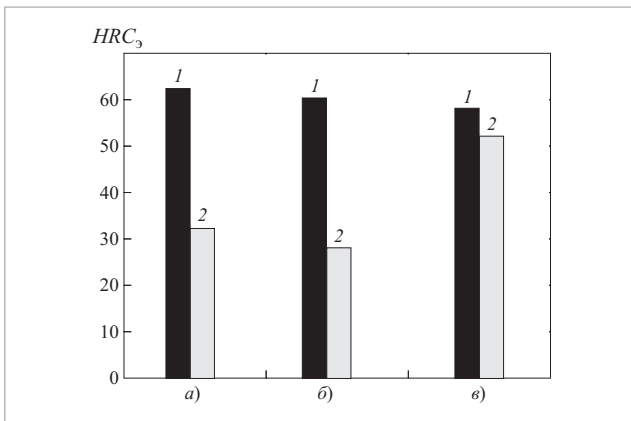


Рис. 3. Твердость HRC_3 образцов сталей 60ПП (*a*), 40X (*б*), 60 (*в*):
 1 — поверхность; 2 — сердцевина

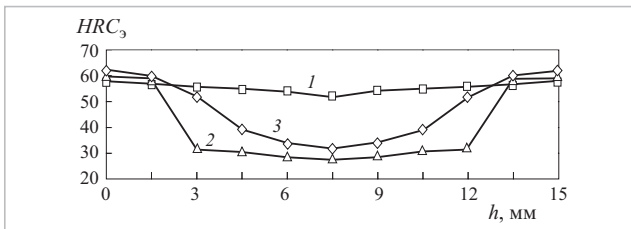


Рис. 4. Изменение твердости HRC_3 в поперечном сечении образцов (*h* — расстояние от одной поверхности до другой по диаметру $\varnothing 15$ мм):
 1 — сталь 60 (объемная закалка); 2 — сталь 40X (поверхностная закалка); 3 — сталь 60ПП (объемно-поверхностная закалка)

показал, что сталь 60ПП после объемно-поверхностной закалки имеет высокую твердость на поверхности ($62 HRC_3$) и достаточную твердость в сердцевине ($32 HRC_3$) образца. Характерно плавное изменение твердости от поверхности к основному металлу. В отличие от этого, в стали 40X после поверхностной закалки наблюдается резкий переход твердости от поверхности к сердцевине металла. У стали 60 после объемной закалки выявлен линейный характер распределения твердости по сечению. При этом твердость стали 60 снижается незначительно от по-

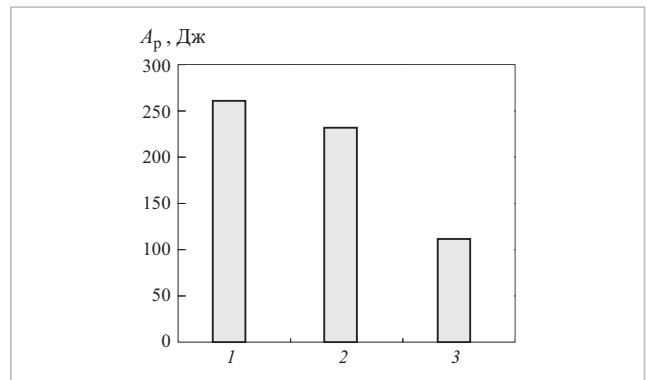


Рис. 5. Работа A_p , затрачиваемая на разрушение образцов при испытании на удар:
 1 — сталь 60ПП (объемно-поверхностная закалка); 2 — сталь 40X (поверхностная закалка); 3 — сталь 60 (объемная закалка)

верхности к сердцевине и составляет 58 и $52 HRC_3$, соответственно (рис. 4).

Испытания на ударную вязкость показали, что работа, которая затрачивается на разрушение образцов стали 60ПП после объемно-поверхностной закалки, выше, чем у образцов стали 40X после поверхностной закалки, и значительно выше, чем у образцов стали 60 после объемной закалки (рис. 5). Такой эффект связан с тем, что для стали 60ПП характерны значительная вязкость сердцевины и плавность перехода структуры от мартенсита к сорбиту по сечению образца. Все это свидетельствует о высоких прочностных характеристиках стали.

Технология объемно-поверхностной закалки с использованием сталей пониженной прокаливаемости характеризуется более высокими прочностными свойствами изделий и низкой стоимостью материала, чем при их изготовлении из высоколегированных сталей. Такая технология выгодна для широкого применения в производстве деталей транспортных средств: валов, осей, зубчатых колес большого модуля (более 5 мм), рельс и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объемно-поверхностная закалка сталей пониженной прокаливаемости обеспечивает плавное из-

менение твердости от поверхности к основному металлу, повышая ударную вязкость исследуемых образцов. Результаты испытаний показывают перспективность представленной технологии.

Финансирование / Funding

Настоящее исследование не получило какого-либо специального гранта от финансирующих агентств в государственном, коммерческом или некоммерческом секторах.

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Заявление об авторском вкладе / Credit authorship contribution statement

Все авторы внесли одинаковый вклад в эту работу.

These authors contributed equally to this work.

Заявление о конфликте интересов / Declaration of competing interest

Авторы подтверждают, что у них нет известных финансовых или межличностных конфликтов, которые могли бы повлиять на исследование, представленное в этой рукописи. Все авторы утвердили окончательный вариант рукописи.

The authors confirm that they have no known financial or interpersonal conflicts that would have appeared to have an impact on the research presented in this study. We are approving the final version of the manuscript.

Наличие экспериментальных данных и материалов / Availability of data and material

Не применимо

Not applicable

Код доступа / Code availability

Не применимо

Not applicable

Дополнительная информация / Supplementary information

Не применимо

Not applicable

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П.* Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
2. *Комаров О. С., Ковалевский В. Н.* Технология конструкционных материалов. М.: Новое знание, 2005. 560 с.
3. *Арзамасов Б. Н., Макарова В. И., Мухин Г. Г.* и др. Материаловедение. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 648 с.
4. *Михлюк А. И.* Новый подход к объемно-поверхностной закалке тяжело нагруженных зубчатых деталей мобильных машин // Инженер-механик. 2010. № 2. С. 21 – 32.
5. *Гордиенко А. И., Михлюк А. И., Ивашко В. В., Вегера И. И.* Влияние режимов нагрева на структуру и механические свойства стали 60ПП // Литье и металлургия. 2011. № 1. С. 146 – 153.
6. *Шепеляковский К. З.* Поверхностная и объемно-поверхностная закалка стали как средство упрочнения ответственных деталей машин и экономии материальных ресурсов // МитОМ. 1993. № 11. С. 8 – 14.
7. *Гурченко П. С., Солонович А. А.* Перспективы применения углеродистых сталей для подшипников и шестерен с упрочнением управляемой объемно-поверхностной закалкой с индукционного нагрева // Литье и металлургия. 2015. № 1. С. 91 – 97.
8. *Зубченко А. С.* Марочник сталей и сплавов. М.: Металлургия, 2003. 764 с.
9. *Гальдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г.* Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
10. *Новиков И. И.* Теория термической обработки. М.: Металлургия, 1986. 480 с.

Статья поступила в редакцию 25.10.2023 г.

Application of volume hardening prospects for vehicle parts made of steels with reduced hardenability

A. E. Unitsky and M. I. Tsyrlin

CJSC “Skyway Technologies”, Minsk, Belarus

Various methods of hardening machine parts and mechanisms are considered. An assessment of the volume-surface hardening of steels with reduced hardenability is given. The structure, hardness and toughness of steels subjected to hardening of various types are investigated. It has been found that volume-surface quenching ensures a uniform distribution of hardness from the surface to the base metal of steels, and their toughness is higher than that of steels subjected to volume or surface quenching. The method of volume-surface hardening is proposed for widespread implementation in the production of vehicle parts.

Keywords: heat treatment, volume quenching, surface quenching, volume-surface quenching, steels of reduced hardenability, structure, hardness, toughness, application of volume-surface quenching.