

УДК 543:621.35

Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение тяжело нагруженных деталей транспортного оборудования

Установлена возможность упрочнения и повышения износостойкости деталей транспортного оборудования, работающего при значительных динамических знакопеременных нагрузках, с использованием закалки токами высокой частоты путем комбинированной объемно-поверхностной термической обработки. Такая обработка не только обеспечивает комплекс необходимых механических свойств, но и способствует восстановлению изношенных при эксплуатации рабочих размеров благодаря применению эффекта изменения удельного объема структурных составляющих при индукционной закалке.

Ключевые слова: детали транспортного оборудования, объемно-поверхностное упрочнение, улучшение, закалка токами высокой частоты, твердость, износ.

Контактная информация: geote@mail.ru, alim41@mail.ru

Тяжелонагруженные детали транспортного оборудования чаще всего изготавливают из легированных улучшаемых сталей, которые подвергают термической обработке (закалка и высокий отпуск). Структура сорбита отпуска, получаемая после улучшения, наиболее благоприятна с точки зрения восприятия динамических нагрузок, но не обеспечивает достаточную износостойкость рабочих поверхностей деталей из-за низкой твердости, а в случае только поверхностного упрочнения происходит снижение ударной вязкости и способности воспринимать динамические нагрузки без разрушения.

Объемно-поверхностное упрочнение – один из способов увеличения срока годности тяжело нагруженных деталей [1], обеспечивающий возможность регулирования глубины поверхностного упрочненного слоя, более высокие механические свойства поверхности, малое коробление, создание в поверхностных слоях значительных сжимающих напряжений. Эти достоинства могут быть использованы также при размерном термическом восстановлении дорогостоящих изделий [2, 3].

Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение состоит в объемной закалке с высоким отпуском и поверхностной закалке с завершающим низким отпуском. На первом этапе обеспечивается вязкость основы при невысокой твердости, на втором – повышение твердости и износостойкости поверхности. Поэтому, чтобы повысить износостойкость и сохранить сопротивление динамическим нагрузкам, рекомендуется объемную термическую обработку проводить в сочетании с разными вариантами термического упрочнения поверхностного слоя [4, 5].

* В экспериментах принимала участие инженер И. В. Жулина (ДонНТУ).



В. И. АЛИМОВ,
доктор техн. наук
(ДонНТУ)



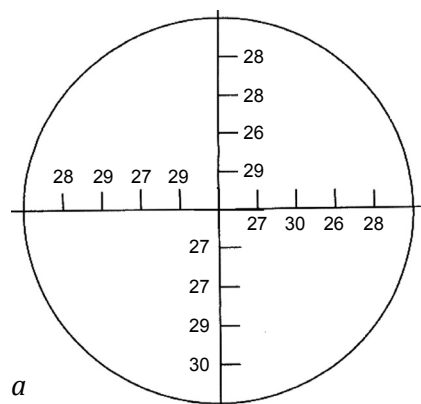
М. В. ГЕОРГИАДУ,
аспирант
(ДонНТУ)



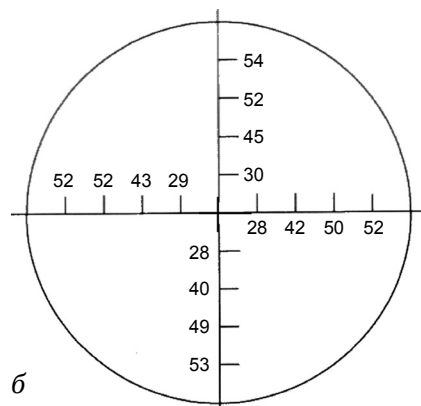
В. В. ЗУБЕНКО,
инж.
(ООО «TERMOLIFE»)

Цель исследования – изучение структуры и свойств легированных улучшаемых сталей при комбинированной термической обработке в объеме и на поверхности тяжело нагруженных деталей транспортного оборудования.

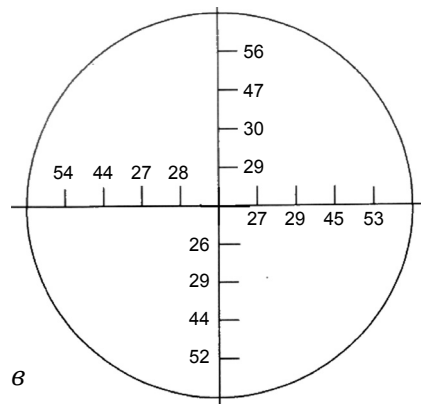
Для исследований* использовали пробы из стали 40ХН, изготовленные из натуральных изделий осевого типа, часть которых улучшали в производственных



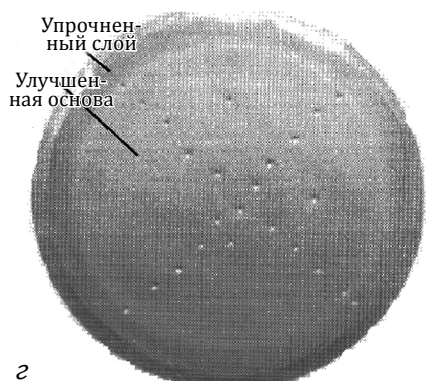
a



б



в



г

условиях, а часть подвергали объемно-поверхностной термической обработке путем объемного улучшения и поверхностной закалки токами высокой частоты с завершающим низким отпуском для снижения уровня остаточных напряжений.

Пробы вырезали из осей диаметром 60 мм, используемых для передачи вращательного движения в приводах механизмов при пересыпании шихты, агломерата или их перемешивании.

Состав проб исследуемой стали 40ХН, определенный химическим анализом, соответствует ГОСТ 4543-71, массовая доля, %: углерод – 0,41; хром – 0,48; марганец – 0,59; никель – 1,08; кремний – 0,22; сера – 0,02; фосфор – 0,01; медь – 0,12; алюминий – 0,021.

При улучшении нагрев проб выполняли: для аустенизации – в печи Г-30 до температуры 840–860 °С с последующим охлаждением в масле; для отпуска – в печи ПН-34 при температуре 540–560 °С; в целях предупреждения обратимой отпускной хрупкости пробы охлаждали в воде.

В случае комбинированной объемно-поверхностной обработки закалку токами высокой частоты для одной части улучшенных проб осуществляли с помощью лампового генератора (частота тока порядка $3 \cdot 10^5$ Гц), а для другой – машинного (частота тока порядка $5 \cdot 10^3$ Гц). Температура нагрева под закалку составила 900–920 °С с завершающим охлаждением водой. Отпуск выполняли при температуре 255–265 °С. Твердость после термической обработки измеряли на твердомере Роквелла (шкала С) по сечению с шагом 0,5 мм.

Исходя из реальных условий работы оси из стали 40ХН, поверхность которой изнашивается в разных коррозионных средах, были выбраны среды для коррозионно-абразивного износа на специальной установке [6–9].

Составы и характеристика коррозионно-абразивных сред: крупный и мелкий щебень; крупный щебень в проточной водопроводной воде; средний щебень; средний щебень в водном растворе поваренной соли; крупный щебень в 5%-м водном растворе серной кислоты. Размерный состав гранул щебня в среде абразива, мм: крупные – 15–20; средние – 6–15; мелкие – 4–6.

Об износе судили по изменению массы проб, используя количественную зависимость

$$I = (m_n - m_k) / S \cdot L,$$

где m_n и m_k – начальная и конечная масса проб, г;

S – площадь контактной поверхности, мм²;

L – длина пути износа пробы, мм.

Микроструктуру изучали с помощью микроскопа NU-2 при увеличении в $\times 600$ раз. Твердость после улучшения в среднем составила (28 ± 1) HRC; распределение ее по поверхности изображено на рис. 1. Поверхностная твердость проб после закалки на машинном генераторе составила (53 ± 3) HRC, а на ламповом генераторе – (55 ± 1) HRC (рис. 1, б–г).

Рис. 1. Распределение твердости после упрочняющей термообработки стали 40ХН путем: а – закалки и высокого отпуска; б и в – закалки с нагревом токами высокой частоты машинным и ламповым генераторами; г – внешний вид пробы после закалки с нагревом токами высокой частоты машинным генератором.

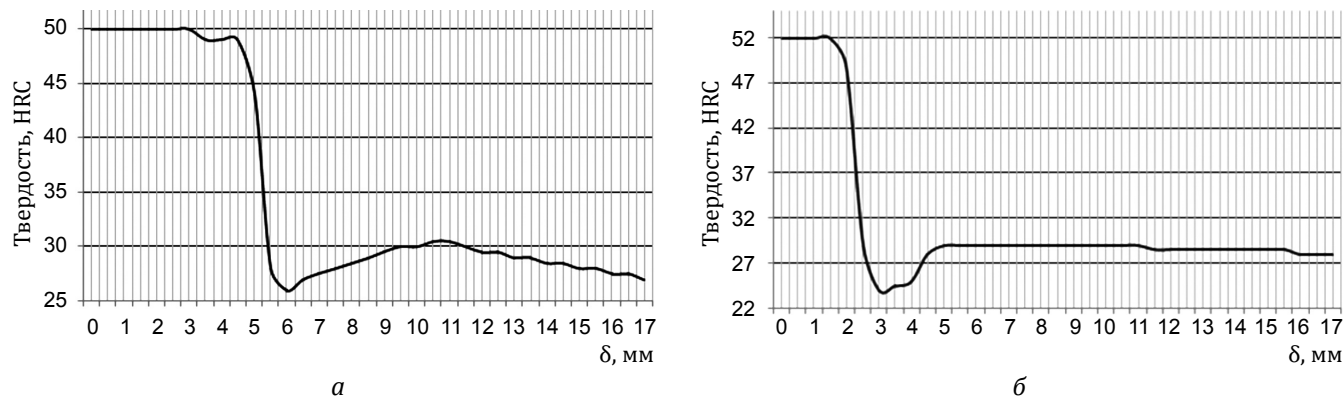


Рис. 2. Зависимость твердости закаленной токами высокой частоты стали 40ХН по площади сечения пробы на генераторах: *а* – машинном; *б* – ламповом.

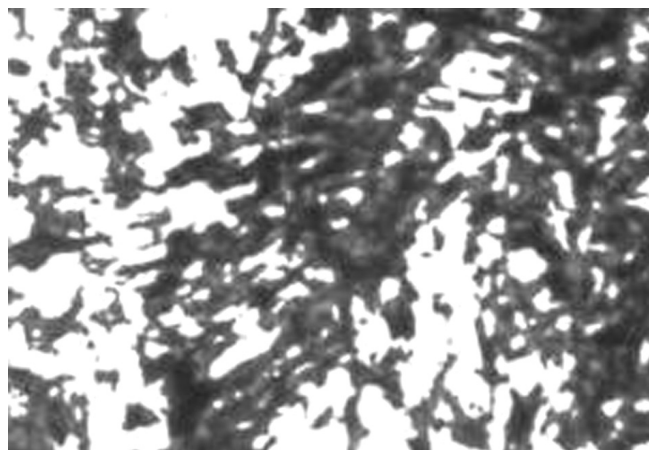
Зависимости изменения твердости по площади сечения проб после упрочнения на машинном и ламповом генераторах показаны на рис. 2, из которых видно, что при закалке первым способом закаленный слой больше, чем при закалке вторым, что соответствует зависимости глубины проникновения тока высокой частоты в металл по Штейнметцу.

Структура проб после улучшения и поверхностного слоя после закалки токами высокой частоты на машинном генераторе в сочетании с низким отпуском состоит из мартенсита отпуска и карбидов (рис. 3), сохраняющихся при скоростном нагреве и непродолжительной выдержке; основа проб представлена структурой сорбита отпуска (рис. 3, б). Микроструктура после объемно-поверхностной обработки с помощью лампового генератора в целом аналогична, но отлича-

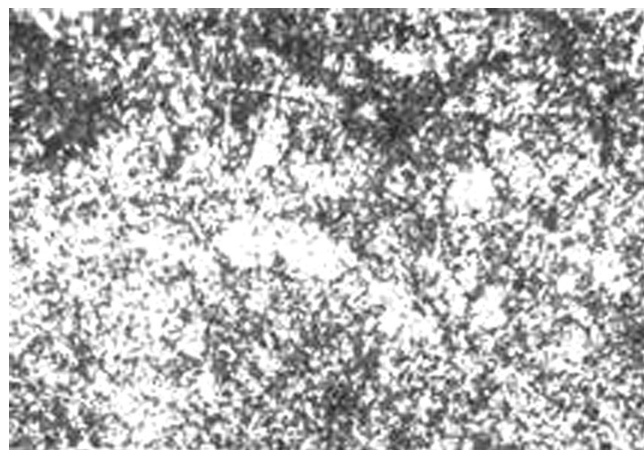
ется дисперсными мартенситными кристаллами – это обеспечивает более высокую твердость. Видно, что существует взаимосвязь распределения микроструктуры с твердостью по площади сечений проб (см. рис. 2).

Анализ макроструктуры поверхности до и после испытаний на коррозионно-абразивный износ показал, что если изначально поверхность проб была блестящей и гладкой, то после испытаний она приобрела матовость, а на некоторых участках по всей площади появились неглубокие впадины, возникшие при износе (при увеличении $\times 50$).

Результаты коррозионно-абразивного износа проб, вырезанных из осей, после улучшения и объемно-поверхностной обработки приведены в таблице, из которой следует, что пробы после улучшения изнашиваются значительно больше



а



б

Рис. 3. Микроструктура стали 40ХН после комбинированной объемно-поверхностной термической обработки: *а* – поверхностный слой. $\times 1000$; *б* – основа. $\times 400$.

ГОРНОШАХТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Среда испытания	$m_n - m_k$, г	S , 10^3 мм^2	L , м	$I, 10^{-10} \times$ $\times \text{г} / (\text{мм}^2 \cdot \text{мм})$	v , мин^{-1}
Улучшенное состояние					
1	0,347	2,17	98,9	16,6	18
2	0,159	2,11	409,8	1,8	87
3	0,171	2,01	202,5	4,2	43
4	0,155	2,09	126,4	5,8	23
5	0,163	2,26	247,3	2,9	45
Комбинированная объемно-поверхностная термообработка					
1	0,014	0,90	87,9	0,75	16
2	0,001	2,08	423,9	0,01	90
3	0,001	2,11	188,4	0,05	40
4	0,066	2,11	98,9	3,20	21
5	0,017	1,99	226,1	0,37	48

в сравнении с пробами после комбинированной объемно-поверхностной термической обработки при одинаковых условиях испытаний. Это связано с отсутствием упрочненного закалкой токама высокой частоты слоя, более твердого, чем сорбитная структура основы.

Поскольку ось – это деталь вращения, то при испытаниях на износ учитывали скорость вращения проб в установке на коррозионно-абразивный износ, что в таблице отражено параметром v .

Выводы. Комбинированная объемно-поверхностная термообработка с использованием токов высокой частоты при предварительно улучшенной микроструктуре способствует повышению не только абразивной, но и коррозионно-абразивной износостойкости деталей транспортного оборудования, работающих со значительными динамическими знакопеременными нагрузками и истиранием поверхности. Кроме того, такая комбинированная обработка создает в поверхностном слое сжимающие напряжения, а при их релаксации возможно восстановление размеров изношенных в процессе эксплуатации изделий. Появление в поверхностном слое мартенсита отпуска, имеющего удельный объем больший, чем у сорбита, также может способствовать суммарному увеличению прироста диаметра осесимметричных деталей.

Следовательно, при использовании комбинированного объемно-поверхностного упроч-

нения тяжело нагруженных деталей транспортного оборудования, включающего закалку токами высокой частоты, решается задача не только сохранения ударной вязкости и повышения износостойкости, но и возможности восстановления изношенных во время эксплуатации рабочих размеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алимов В. И. Автономное упрочнение деталей горношахтного оборудования / В. И. Алимов, М. В. Георгиаду, В. В. Зубенко // Уголь Украины. – 2015. – № 7–8. – С. 40–43.
2. Алімов В. І. Термічне відновлення радіальних розмірів деталей гідравліки шахтного кріплення / В. І. Алімов, М. В. Георгиаду, Л. О. Желтобрух // Уголь Украины. – 2014. – № 5. – С. 34–38.
3. *To a question of the restoration of crucial tool and details after the exploitation* / V. I. Alimov, M. V. Georgiadou, L. O. Zheltobruh [Текст] // Стратегия качества в промышленности и образовании: сб. материалов VI Междунар. конф. – Варна, 2010. – С. 63–66.
4. Алімов В. І. Підвищення експлуатаційних властивостей ланок ланцюгів гірничошахтних конвеєрів / В. І. Алімов, А. П. Штихно, О. І. Шевелєв // Уголь Украины. – 2014. – № 4. – С. 10–14.
5. Алимов В. И. О перспективах использования низкоуглеродистых легированных сталей для элементов тяговых органов конвейеров / В. И. Алимов, Т. А. Щеголева // Вестн. Дон-НАСА. – 2005. – № 4(52). – С. 135–138.
6. Пат. 17644 Україна, МПК(2006), G01N 3/56, G01N 17/00. Пристрій для випробувань на корозійно-абразивний знос / Алімов В. І., Штихно А. П., Афанасьєва М. В.; заявник Алімов В. І.; патентовласник Донецький нац. техн. ун-т; № u200602208; заявл. 28.02.06; опубл. 16.10.06, Бюл. № 10. – 4 с.
7. Пат. 27165 Україна, МПК(2007), G01N 3/56, G01N 17/00. Пристрій для випробувань на газово-абразивний знос / Алімов В. І., Штихно А. П., Афанасьєва М. В.; заявник Алімов В. І.; патентовласник Донецький нац. техн. ун-т; № u200704179; заявл. 16.04.07; опубл. 25.10.07, Бюл. № 7. – 4 с.
8. Пат. 49721 Україна, МПК(2009), G01N 3/56, G01N 17/00. Спосіб оцінки локальної зносостійкості металевих виробів / Алімов В. І., Шевелєв О. І., Георгиаду М. В., Педан Д. М., Шкляріков Д. Є.; заявник Алімов В. І., патентовласник Алімов В. І. – № u200911384; заявл. 09.11.09; опубл. 11.05.10, Бюл. № 9. – 8 с.
9. Пат. 80394 Україна, МПК(2013), G01N 17/00. Пристрій для випробування на корозійно-ерозійне зношування / Дурягіна З. А., Алімов В. І., Цигилик Н. В., Підкова В. Я., Георгиаду М. В., Ольшевська С. О.; заявник Алімов В. І., патентовласник Нац. ун-т «Львівська політехніка». – № u201214075; заявл. 10.12.12; опубл. 27.05.13, Бюл. № 10. – 2 с.