

УДК 620.178.152.2:621.785.5

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 65Г¹

© И. А. Растегаев², В. А. Коротков³, М. А. Афанасьев², Д. Л. Мерсон²*Статья поступила 29 марта 2016 г.*

Установлено, что износостойкость слоя на стали 65Г, полученного плазменной закалкой на серийной установке УДГЗ-200, в условиях сухого трения повышается неравномерно. На расстоянии от поверхности до 1,0 мм (участок полной закалки) износостойкость увеличивается в 6,6 – 9,0 раза относительно незакаленного металла. На глубине 1,3 – 1,9 мм (участок неполной закалки) износостойкость постепенно снижается до уровня незакаленного металла. Непосредственно закаленная поверхность на глубине до 30 мкм имеет повреждения от воздействия плазменной дуги, снижающие ее износостойкость. Износостойкость индентора из закаленной стали, которым проводили испытания на трение, на участке полной закалки в 1,4 раза ниже, чем при трении по незакаленному металлу.

Ключевые слова: поверхностная закалка; плазменная обработка; износостойкость.

Плазменная закалка производится перемещением по поверхности деталей плазменной дуги. Важным преимуществом такой закалки является то, что благодаря небольшому пятну нагрева не требуется подача воды на деталь, а достаточно теплоотвода в тело детали, что позволяет осуществлять ее не только в специализированных цехах, но и по месту механообработки деталей. В 80 – 90-е годы XX века специализированных установок для плазменной закалки не выпускалось, поэтому исследователи модернизировали серийные плазменные установки для сварки, резки, напыления [1 – 3]. В последнее десятилетие в технологии плазменной закалки благодаря применению дуги обратной полярности достигнут значительный прогресс и начат

серийный выпуск специализированной установки УДГЗ-200. Она допускает ручное ведение процесса, что сделало плазменную закалку доступной для широкого применения [4 – 6]. Исследования износостойкости различных сталей, упрочненных плазменной закалкой на этой установке [7 – 10], показали ее преимущество перед традиционными видами термической обработки — нормализацией и улучшением. Однако в этих исследованиях остался не изученным вопрос, как изменяется износостойкость закаленного слоя металла по глубине, т.е. по мере удаления от свободной поверхности. Поэтому цель данной работы — изучение изнашивания закаленного слоя на различном удалении от поверхности.

Исследования проводили на полосе из стали 65Г (ГОСТ 14959–79) в нормализованном состоянии. На установке УДГЗ-200 выполняли однопроходную плазменную закалку поверхности этой полосы, из которой затем вырезали два образца. В поперечном сечении одного образца исследовали микроструктуру (микроскоп Zeiss Axiovert 40 MAT) и микротвердость (прибор TIME Group HVS-1000). На втором образце (рис. 1) изучали изнашивание закаленных слоев на разном удалении от поверхности, для чего ее подвергали многократной шлифовке.

Испытания на износ проводили на приборе NANOVEA TRB 50N. Для этого по образцу без смазки стальным индентором ШХ-15 (ГОСТ 801–78) диаметром 9,5 мм (HRC 62 – 66, R_a 0,02 – 0,05 мкм) совершали возвратно-поступательные движения. Параметры процесса: амплитуда 10 мм; частота 5 Гц; нагрузка на индентор $25 \pm 0,5$ Н; продолжительность теста — 100 м.

Измеряли и рассчитывали следующие характеристики изнашивания: ΔV — объемный износ образца; Δm — массовый износ индентора (определяли на весах Sartorius ED-224S); R_z — среднюю шероховатость

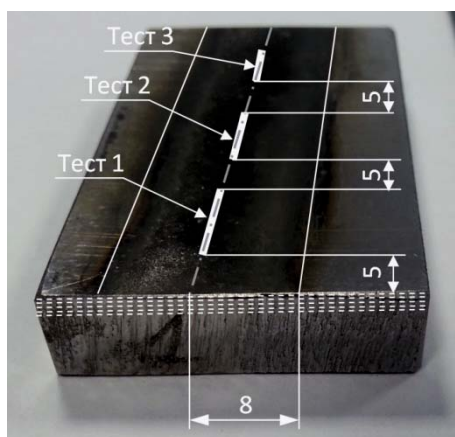


Рис. 1. Образец для испытаний на изнашивание по мере удаления от поверхности

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект № 11.8236.2017/П220.

² Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия; e-mail: rastigaev@yandex.ru

³ Нижнетагильский филиал Уральского федерального университета, г. Нижний Тагил, Россия.

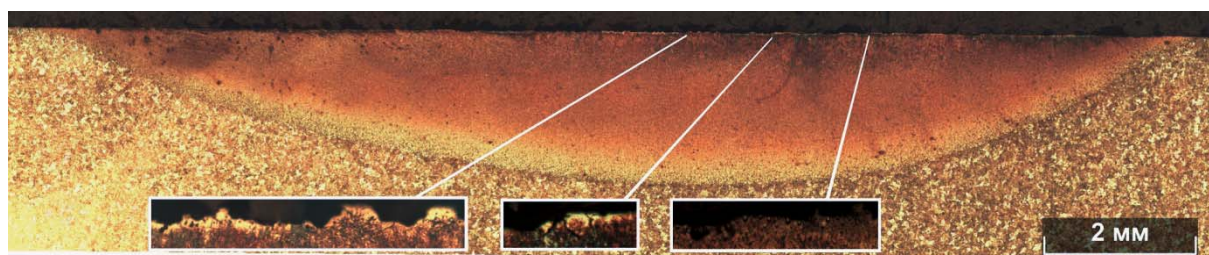


Рис. 2. Поперечный шлиф закаленной полосы; в прямоугольниках показаны увеличенные фрагменты микроповреждений поверхностного слоя, возникающие при закалке от воздействия дуги (поры, трещины)

дорожки трения в направлении, перпендикулярном движению, по девяти сечениям через 0,8 мм; $\dot{I}$ — скорость изнашивания; I — износостойкость.

Величины параметров $\dot{I}$ и I рассчитывали для образца через ΔV ($\dot{I}_v$ и I_v), для индентора — через Δm ($\dot{I}_m$ и I_m):

$$\dot{I}_v = \Delta V / \Delta t, \quad \dot{I}_m = \Delta m / \Delta t; \quad (1)$$

$$I_v = 1 / \dot{I}_v, \quad I_m = 1 / \dot{I}_m. \quad (2)$$

Параметры ΔV и R_z рассчитывали по 3D-сканам, полученным при увеличении 400, на конфокальном сканирующем лазерном микроскопе Olympus LEXT OLS4000 ver. 1.4.1 при сшивке 200 срезов по вертикальной оси с помощью штатного программного обеспечения.

Образцы подготавливали к испытаниям следующим образом:

промывали мягким очистителем;

сушили горячим воздухом;

очищали в нефрасе С2-80/120 ТУ 38.401-67-108–92;

сушили горячим воздухом;

закрепляли и протирали хлопковой ветошью, смоченной нефрасом.

Тесты на изнашивание проводили поочередно с удалением от поверхности на (0,0 – 0,1 – 0,6 – 1,0 – 1,3 – 1,6 – 1,8 – 1,9 – 2,2) мм. Уровень (слой) 0,0 представлял собой поверхность, по которой прошла плазменная дуга. Последующие уровни (слои) получали в результате шлифования образца на станке 3В642 с доводкой до шероховатости R_z 3,2. После шлифования образец перед испытанием на трение размагничивали.

На каждом слое проводили три теста; дорожки трения отстояли друг от друга на расстоянии 5 мм и находились по средней линии закаленного слоя (см. рис. 1). Дорожки трения в каждом слое располагались друг под другом, что обеспечивалось выставлением индентора по координатам относительно торцов образца с точностью до 0,1 мм.

Закаленная полоса с исходной шероховатостью поверхности R_z 20 (глубина 0,0 мм) имеет в поперечном сечении (рис. 2) форму сегмента шириной 16 мм. Микроструктура закаленного и незакаленного метал-

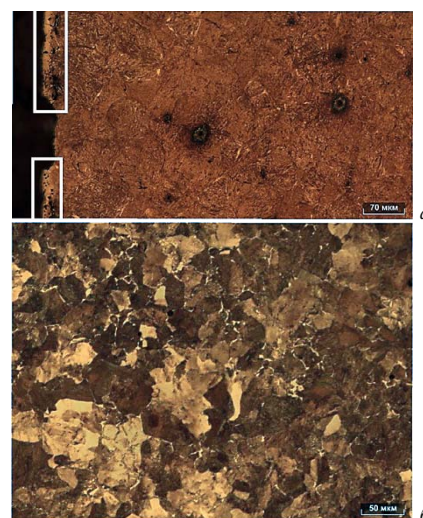


Рис. 3. Микроструктура стали 65Г: а — закаленная полоса — мартенсит; б — незакаленная полоса — феррито-перлит; прямоугольниками выделены поры, возникающие при закалке от воздействия дуги

ла (рис. 3) представляет собой мартенсит и феррито-перлит соответственно.

Микротвердость (рис. 4) по центру закаленного сегмента на глубине до 1,0 мм имеет высокие значения — $HV956$ – 996 . На глубине 1,3 – 1,6 мм она незначительно снижается — до $HV900$ – 857 , а затем (на удалении 1,8 – 1,9 мм) она резко падает до $HV766$ – 798 . На расстоянии от поверхности, равном 2,2 мм, закаленный слой заканчивается и начинается основной нормализованный металл с микротвердостью $HV312$.

Характеристики изнашивания в паре трения «образец – индентор» приведены также на рис. 4 в виде графика микротвердости. Можно видеть, что закаленная поверхность образца (глубина 0,0 мм) в 2,6 раза превосходит по износостойкости сталь 65Г в нормализованном состоянии (расстояние от поверхности 2,2 мм) — 205 и 80 мин/мм³ соответственно. В слое на глубине 0,1 мм, имеющем равную с поверхностью микротвердость ($HV956$), износостойкость повысилась по отношению к нормализованной стали до 9,0 раз. На нижележащих уровнях (глубиной 0,6 и 1,0 мм) средняя микротвердость несколько увеличилась ($HV975$ – 996), но средняя износостойкость (530 мин/мм³) незначительно (до 6,6 раз) снизилась по отношению к нормализованной стали

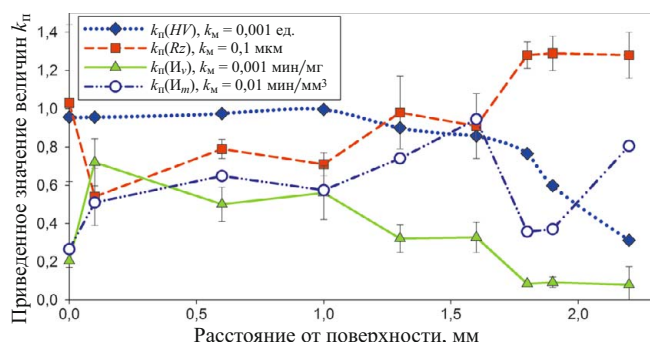


Рис. 4. Изменения микротвердости образца (HV) и характеристик износа в паре трения «индентор – образец» по глубине закаленного слоя: I_m — износостойкость индентора; I_v — износостойкость образца; Rz — средняя шероховатость дорожки трения после испытания (реальная измеренная величина равна произведению получаемого по графику приведенного значения k_n на масштабный коэффициент k_M , указанный в информационной таблице для соответствующей величины)

(80 мин/мм³). При удалении от поверхности на 1,3 и 1,6 мм при значениях микротвердости $HV900$ – 857 износостойкость уменьшилась в среднем до 325 мин/мм³, что в 4,1 раза выше, чем основного металла без закалки. Еще глубже (1,8 и 1,9 мм) несмотря на относительно высокую микротвердость $HV766$ – 598 износостойкость в среднем (88 мин/мм³) лишь незначительно (в 1,1 раза) превосходит I нормализованной стали.

Износостойкость индентора при трении на закаленных участках образца, на расстояниях 0,1 – 0,6 – 1,0 мм от поверхности, составляет в среднем 58 мин/мм³, что лишь незначительно (в 1,4 раза) меньше его износостойкости на незакаленном металле (80,6 мин/мм³). При трении по закаленной поверхности образца индентор, подобно образцу, имел невысокую износостойкость (26,5 мин/мм³), а по мере углубления (на 1,3 – 1,9 мм) и понижения микротвердости, она изменялась скачкообразно: сначала увеличилась, а затем уменьшилась по отношению к уровню износостойкости при трении о незакаленный металл.

Шероховатость поверхности Rz , формирующаяся в ходе испытаний, возрастает по мере удаления от первоначальной поверхности образца.

Известно, что при шлифовании в поверхностных слоях происходят структурные изменения, которые могут существенно влиять на его механические характеристики, а следовательно, и на износостойкость (см. например, [11]). Поэтому при шлифовании были приняты все возможные меры, направленные на снижение температурного и механического повреждения поверхностного слоя. Это обеспечивалось охлаждением, закреплением образца на массивном магнитном столе, использованием высокопористого абразивного круга на керамической связке, многопроходным послойным шлифованием (глубина шлифования 0,01 мм, ширина — 5,0 мм за проход, подача 0,1 м/мин, скорость резания 17,5 м/с). При данном режиме шлифования не наблюдались видимые при-

знаки повреждения поверхности, т.е. отсутствовали прижоги, зоны с цветами побежалости, трещины и пластические сдвиги материала.

Закаленный слой образуется в результате нагрева металла до температур выше температуры начала аустенизации (A_{c1}) и последующего быстрого охлаждения. Для стали 65Г температура начала аустенизации при изотермическом нагреве составляет 721 °С [12], но в условиях быстрого нагрева ее значение перемещается в область более высоких температур. В качестве границы слоя плазменной закалки можно принять расположение изотермы 750 °С [13]. Чем ближе к поверхности, тем до более высоких температур происходит нагрев, и, следовательно, металл проходит более полную аустенизацию, что предопределяет получение более высокой твердости при охлаждении. Убывание степени аустенизации в нижней части закаленного слоя предопределило снижение его твердости (см. рис. 4).

Непосредственно на поверхности и на глубине 0,1 мм микротвердость меньше, чем на глубине 0,6 и 1,0 мм. Это явление отмечали и другие исследователи [14, 15] и объясняли его сохранением здесь остаточного аустенита вследствие более полного протекания процессов аустенизации.

Результаты испытаний показывают, что износостойкость закаленного слоя зачастую находится в прямой зависимости от величины твердости: чем выше твердость, тем больше износостойкость ($I \approx HV$). Но в проведенном исследовании данная зависимость имеет аномальный участок. Поверхностный слой, имеющий твердость, равную с лежащим под ним на глубине 0,1 мм слоем, получил более значительный износ. Это можно объяснить тем, что в исходном состоянии шероховатость нулевого слоя существенно выше, чем всех последующих слоев (Rz 20 и Rz 3,2 соответственно), а также тем, что закаленная поверхность перед испытаниями уже имела микроповреждения (глубиной около 30 мкм) от воздействия дуги, которые видны на рис. 2 и 3.

На глубине 0,1 мм износостойкость наибольшая, что можно связать с наличием здесь остаточного метастабильного аустенита, который, как известно, при механическом воздействии претерпевает мартенситное превращение, повышая износостойкость.

На глубине 1,3 – 1,6 мм твердость закаленного слоя уменьшается до $HV900$ – 857, что свидетельствует о начале участка неполной закалки. При этом существенно снижается износостойкость образца (в 1,7 раза по отношению к глубине 1,0 мм), но примерно пропорционально увеличивается износостойкость индентора (см. рис. 4). При дальнейшем снижении твердости до $HV766$ – 598 на глубине 1,8 – 1,9 мм происходит одновременное заметное снижение износостойкости и образца и индентора, что сопровождается существенным ростом шероховатости. При переходе к незакаленному металлу износостойкость образца не изменяется, но износостойкость индентора резко уве-

личивается при том же уровне шероховатости. В целом участок неполной закалки (расстояние от поверхности 1,3 – 1,9 мм) отличается пониженной износостойкостью из-за интенсификации процессов схватывания между трущимися поверхностями.

Проведенные исследования показали, что слой плазменной закалки на стали 65Г глубиной 1,9 мм, полученный на серийной установке УДГЗ-200, имеет следующие особенности.

1. Закаленная поверхность от воздействия плазменной дуги имеет некоторый нагар (в виде цветов побежалости) и микроповреждения глубиной ~30 мкм, что уменьшает ее износостойкость, но оставляет на достаточно высоком уровне — в 2,2 раза выше, чем износостойкость стали 65Г в нормализованном состоянии.

2. Слой, лежащий на глубине 0,1 мм, имеет износостойкость в девять раз большую, чем нормализованная сталь.

3. На глубине от 0,6 до 1,0 мм *И* закаленного слоя превосходит незакаленную сталь в 6,6 раза.

4. Упрочненный слой на глубине 1,3 – 1,9 мм претерпевает неполную закалку, что проявляется в снижении микротвердости и износостойкости; последняя на глубине 1,3 – 1,6 мм снижается до 4,1 раза по отношению к незакаленной стали.

5. На глубине 1,8 – 1,9 мм превосходство в износостойкости закаленного металла над незакаленным становится минимальным — 1,1 раз, несмотря на то, что микротвердость здесь еще имеет значительную величину *HV*766 – 598.

6. На участках полной закалки (до 1,0 мм), за исключением закаленной поверхности, износостойкость индентора из закаленной стали ШХ-15 лишь незначительно (в 1,4 раза) снизилась по отношению к *И* при трении по незакаленному металлу. На глубине неполной закалки (1,3 – 1,9 мм) *И* индентора сначала возросла (вероятно, из-за снижения износостойкости образца), но затем снизилась из-за интенсификации процессов схватывания, проявившихся в росте шероховатости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лещинский Л. К. Структура и свойства наплавленного металла углеродистых сталей, упрочненных плазменной струей / Сварочное производство. 1985. № 11. С. 20 – 22.
2. Кобыakov О. С., Гринзбург Е. Г. Использование микроплазменного нагрева в процессах упрочняющей технологии / Автоматическая сварка. 1985. № 5. С. 65 – 67.
3. Коротков В. А., Баскаков Л. В., Толстов И. А., Бердников А. А. Восстановление и упрочнение роликов рольгангов / Сварочное производство. 1991. № 3. С. 31 – 33.
4. Пат. 2313581 Российская Федерация. Способ ручной плазменной закалки / Коротков В. А., Михайлов И. Д., Агафонов Э. Ж., Бабайлов Д. С.; заявитель и патентообладатель ООО «Композит»; № 2005132440/02; заявл. 20.10.05; опубл. 27.12.07. Бюл. № 36.
5. Шекуров А. В., Коротков В. А. Влияние полярности дуги на глубину и твердость слоя плазменной закалки стали 40 / Сварочное производство. 2008. № 7. С. 32 – 34.
6. Коротков В. А., Макаров С. В. Установка для ручной поверхностной закалки плазменной дугой / Металлообработка. 2009. № 5. С. 43 – 46.

7. Коротков В. А. Износостойкость материалов с плазменной закалкой / Трение и износ. 2011. Т. 32. № 1. С. 23 – 29.
8. Коротков В. А., Злоказов М. В. Исследование износостойкости углеродистых сталей, упрочненных плазменной закалкой / Трение и износ. 2014. Т. 35. № 2. С. 178 – 182.
9. Коротков В. А., Злоказов М. В. Исследование износостойкости штамповых сталей, прошедших упрочнение плазменной закалкой / Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 59 – 61.
10. Ананьев С. П., Коротков В. А. Исследование износостойкости материала крановых рельс и колес / Вестник машиностроения. 2011. № 8. С. 35 – 37.
11. Попова Л. Е., Попов А. А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: Справочник термиста. — М.: Металлургия, 1991. — 503 с.
12. Коротков В. А., Ананьев С. П., Шекуров А. В. Исследование влияния скорости охлаждения на структуру и механические свойства металла при плазменной закалке / Сварочное производство. 2013. № 2. С. 26 – 29.
13. Давыдов В. Н. и др. Особенности электродуговой поверхностной закалки валковых сталей / Бюл. «Черная металлургия». 1990. № 5. С. 58 – 60.
14. Бердников А. А., Филиппов М. А., Студенок Е. С. Структура закаленных углеродистых сталей после плазменного поверхностного нагрева / Металловедение и термическая обработка металлов. 1997. № 6. С. 2 – 4.
15. Яшеритын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. — М.: Наука и техника, 1977. — 256 с.

REFERENCES

1. Leshchinskii L. K. Structure and properties of the weld metal carbon steel, hardened plasma jet / Svaroch. Proizv. 1985. N 11. P. 20 – 22 [in Russian].
2. Kobayakov O. S., Grinzburg E. G. Using micro plasma heating during the hardening technology / Avtomat. Svarka. 1985. N 5. P. 65 – 67 [in Russian].
3. Korotkov V. A., Baskakov L. V., Tolstov I. A., Berdnikov A. A. Restoration and hardening of roller table rollers / Svaroch. Proizv. 1991. N 3. P. 31 – 33 [in Russian].
4. RF Pat. No. 2313581. Manual plasma quenching method / Korotkov V. A., Mikhailov I. D., Agafonov É. Zh., Babailov D. S.; owner JSC «Kompozit»; N 2005132440/02; appl. 20.10.05; publ. 27.12.07. Byull. Otkryt. Izobret. N 36 [in Russian].
5. Shekurov A. V., Korotkov V. A. Effect of arc polarity to the depth and hardness of the plasma hardening layer of steel 40 / Svaroch. Proizv. 2008. N 7. P. 32 – 34 [in Russian].
6. Korotkov V. A., Makarov S. V. Installation for manual plasma arc surface hardening / Metalloobrabotka. 2009. N 5. P. 43 – 46 [in Russian].
7. Korotkov V. A. Wear-resistant materials with the plasma quenching / Trenie Iznos. 2011. Vol. 32. N 1. P. 23 – 29 [in Russian].
8. Korotkov V. A., Zlokazov M. V. Study of wear resistance of carbon steels, hardened by quenching the plasma / Trenie Iznos. 2014. Vol. 35. N 2. P. 178 – 182 [in Russian].
9. Korotkov V. A., Zlokazov M. V. Study of wear resistance of die steels, plasma quenching hardening of the past / Vestn. Mashinostr. 2014. N 8. P. 59 – 61 [in Russian].
10. Anan'ev S. P., Korotkov V. A. Study of wear resistance of the material, and crane rail wheels / Vestn. Mashinostr. 2011. N 8. P. 35 – 37 [in Russian].
11. Popova L. E., Popov A. A. Austenite transformation diagrams in steel and beta-titanium alloys in the solution: Directory treater. — Moscow: Metallurgiya, 1991. — 503 p. [in Russian].
12. Korotkov V. A., Anan'ev S. P., Shekurov A. V. Investigation of the effect of cooling rate on the structure and mechanical properties of the metal at a plasma quenching / Svaroch. Proizv. 2013. N 2. P. 26 – 29 [in Russian].
13. Davydov V. N. et al. Features electric roller surface hardening steels / Byul. «Chern. Metallurg». 1990. N 5. P. 58 – 60 [in Russian].
14. Berdnikov A. A., Filippov M. A., Studenok E. S. The structure of hardened carbon steel after plasma surface heating / Metalloved. Termich. Obrab. Met. 1997. N 6. P. 2 – 4.
15. Yashcheritsyn P. I., Ryzhov É. V., Averchenkov V. I. Technological heredity in mechanical engineering. — Moscow: Nauka i tekhnika, 1977. — 256 p. [in Russian].