

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ФИНИШНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

¹Пантелеенко Ф.И., ²Парецкая Е.А., ²Поздняков Е.П.,
⁴Радионов А.В., ³Серафимович А.А., ²Степанкин И.Н.

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь,

²Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого,

³ОАО «Гомсельмаш» – управляющая компания холдинга»,
г. Гомель, Республика Беларусь,

⁴ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга БМК»,
г. Жлобин, Республика Беларусь

Исследовано влияние режимов финишной термической обработки на структурообразование и распределение микротвердости в науглероженном слое стали 16Mn-GrS5. Выявлены причины самопроизвольного отшелушивания упрочненного слоя, закалка которого осуществлялась с применением токов высокой частоты, и разработаны режимы объемной закалки, обеспечивающие устранение дефектов перегрева с получением высоких технологических и эксплуатационных характеристик упрочненных деталей машин, изготавливаемых ОАО «Гомсельмаш» – управляющая компания холдинга».

Ключевые слова: износостойкость, цементуемые стали, остаточный аустенит, химико-термическая обработка, закалка токами высокой частоты и объемным нагревом.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF A CARBON LAYER OF CONSTRUCTION STA-AFTER DIFFERENT REGIMES OF FINISHING HEAT TREATMENT

¹Panteleyencko F.I., ²Paretckaya E.A., ²Pozdniakov E.P.,
⁴Radionov A.V. ³Serafimovich A.A., ²Stepankin I.N.

¹Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus,

² Sukhoi State Technical University of Gomel,
³OJSC “Gomselmash” – holding managing company,
Gomel, Republic of Belarus,

⁴OJSC «BSW – management company of «BMC» holding»,
Zhlobin, Gomel region, Republic of Belarus

The influence of the modes of finishing heat treatment on the structure formation and the distribution of microhardness in the carburized steel layer 16MnGrS5 has been investigated. The reasons for the self-separation of the hardened layer hardening were revealed using high-frequency currents and developed volumetric hardening modes that ensure elimination of overheating defects with obtaining high technological and operational characteristics of the hardened machine parts manufactured by OJSC Gomselmash – holding management company.

Keywords: wear resistance, steel for carburizing, residual austenite, chemical-heat treatment, hardening by high-frequency currents and volumetric heating.

E-mail: igor-stepankin@mail.ru

Введение

Активное влияние на конъюнктуру металлургической продукции на внутреннем и внешнем рынках является одним из важных аспектов инновационной политики ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга БМК». Один из аспектов эффективного совершенствования современной бизнес модели предприятия – выплавка сталей, востребованных как в дальнем, так и ближнем зарубежье [1]. Сталь 16MnCrS5, производимая в соответствии с EN10 084 является заменителем широко известной стали 18ХГТ ГОСТ 4543-71. Устойчивый спрос западных партнеров на указанный сплав объясняет стремление предприятия к увеличению объема плавки. Это позволяет поддерживать на высоком уровне качественные показатели в каждой плавке и обеспечивать рентабельность сталеплавильного производства. Экспортная привлекательность стали 16MnCrS5 является драйвером продвижения указанного сплава на внутреннем рынке Республики Беларусь. Она определяет необходимость повышения доли его использования отечественными предприятиями. Для этого важной научно-технической задачей является всестороннее изучение процессов структурообразования указанной стали с целью достижения высоких эксплуатационных характеристик деталей машин.

Цель исследования – изучение влияния режимов термохимической обработки стали 16MnGrS5 на морфологию и свойства её науглероженных слоев.

Объекты и методики исследований

Объектом исследований являлись науглероженные слои стали 16MnGrS5. Цементацию в течение 8 часов при температуре 920 °С проводили в универсальной камерной печи с CASEMASTERAFS-242 436, выдерживая значение углеродного потенциала на уровне 1,2 % в пересчете на массовую долю данного элемента в рабочей среде.

Поверхностную закалку токами высокой частоты (ТВЧ) осуществляли с использованием высокочастотного генератора ВЧГ-160, оснащенного спиральным индуктором. Объемную закалку проводили с температуры 840 °С в масле. Использовали два варианта объемной закалки. В первом случае её проводили непосредственно после цементации с подсуживанием. Во втором – цементацию завершали охлаждением на воздухе (нормализацией), а для закалки детали повторно нагревали в камерной печи. Окончательная термическая обработка – отпуск, во всех случаях проводилась при температуре 200 °С в течении 1 часа.

Металлографические исследования проводили с применением оптического микроскопа Метам РВ22. Травление микрошлифов осуществляли реактивом Каллинга

и реактивами на основе хлорного железа, соляной кислоты, а также наиболее часто используемым спиртовым раствором азотной кислоты. Пробоподготовку образцов для выявления структуры металла на поперечных шлифах осуществляли путем электроэрозионного разделения образцов проволочным инструментом в среде дистиллированной воды. Окончательная шлифовка и полировка микрошлифов проводилась с интенсивным жидкостным охлаждением

Результаты исследований и их обсуждение

С технологической точки зрения сталь 16MnGrS5 относится к классу цементуемых, применение которых для широкого круга деталей машин требует учета склонности этого материала к росту зерна в процессе нагрева. Пристальный интерес к данному металлургическому аспекту выражается в совершенствовании химического состава стали 16MnGrS5 отечественными учеными металловедом. Микролегирование такими элементами ванадием, ниобием и титаном позволяет скорректировать наследственную зернистость и улучшить технологичность в части химико-термической и последующей термической обработок [2].

При этом режим термической обработки, проводимой по окончании цементации, заслуживает особого внимания не только по причине его влияния на качественные характеристики упрочненного слоя, но и точки зрения экономических показателей, обеспечивающих снижение накладных расходов, что особенно актуально в масштабах массового производства деталей машин. По этим соображениям последовательность переходов операции термической обработки: науглероживание – закалка – отпуск, включающей закалку ТВЧ, является привлекательной технологией. В результате существенно сокращается операционное время и не требуется больших энергетических затрат на использование камерных печей для объемной закалки. Кроме того, сердцевина металла приобретает высокую вязкость, благодаря тому, что режим предыдущей обработки – цементации, по своему результату в отношении к внутренним слоям металла близок к полному отжигу.

Одним из основных недостатков закалки ТВЧ является высокая вероятность неконтролируемого повышения температуры аустинизации, что неблагоприятно сказывается на росте зерна металла. Несмотря на благоприятное воздействие сильных карбидообразующих элементов, режим нагрева с достижением высоких значений температур поверхностных слоев металла, может спровоцировать перегрев, что в итоге неблагоприятно отразится на размерах действительного зерна сплава.

Практическое подтверждение неблагоприятного прогноза результатов интенсивного нагрева ТВЧ было получено в рамках сотрудничества с ОАО «Гомсельмаш» – управляющая компания холдинга». Деталь «Цапфа» №КЗК-12-0 290 640, в соответствии с базовой технологией, после науглероживания подвергали закалке (ТВЧ) и низкотемпературному отпуску. После этого сопрягаемую поверхность детали (защищенную от науглероживания) соединяли дуговой сваркой с остальными элементами сборочного узла. Окончательной операцией являлась механическая обработка (шлифование) наружной цилиндрической поверхности в зоне упрочненного слоя. В результате проведенной обработки возникали случаи самопроизвольного отделения шлифованного поверхностно-упрочненного слоя (рис. 1). С момента окончания механической обработки до возникновения трещин проходило от нескольких часов до нескольких суток. В отдельных партиях деталей доля бракованных изделий достигала 30 %.

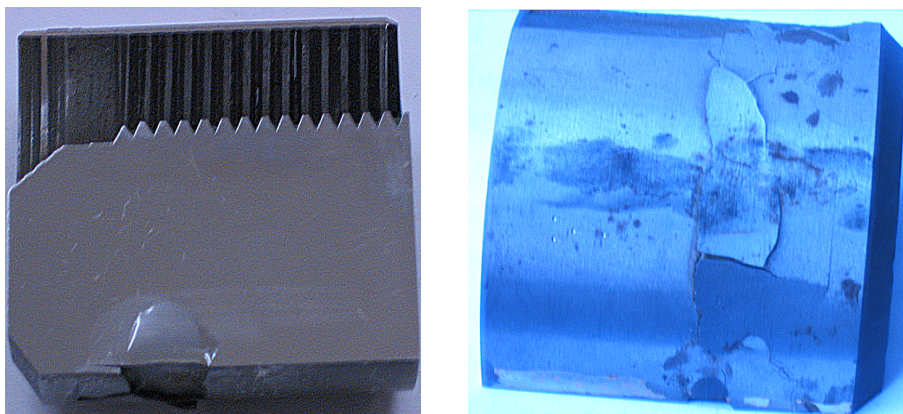


Рис. 1. Область структурных исследований в окрестности подповерхностных трещин детали «Цапфа» №КЗК-12-0290640

Анализ структуры поверхностного слоя показал, что в результате закалки ТВЧ в упрочненном слое происходил аномальный рост зерна. Продольные размеры отдельных структурных составляющих достигали 100 и более мкм, что соответствует 3–4 баллу зерна согласно ГОСТ 5639. При этом контуры межзеренных границ твердого раствора отличаются протяженными криволинейными очертаниями, характерными для литой структуры. Они имеют морфологию близкую к ледебуритной эвтектике железоуглеродистых сплавов с содержанием углерода свыше 2 % (рис. 2,а). После травления микрошлифа реактивами на основе хлорного железа и соляной кислоты выявлено, что размеры мартенситных игл достигают величины порядка 8–10 мкм, что согласно ГОСТ 8233 классифицируется как среднеигльчатый мартенсит (рис. 3,б). В сердцевине металла выявлено наличие единичных достаточно крупных ферритных зерен (рис. 3,в).

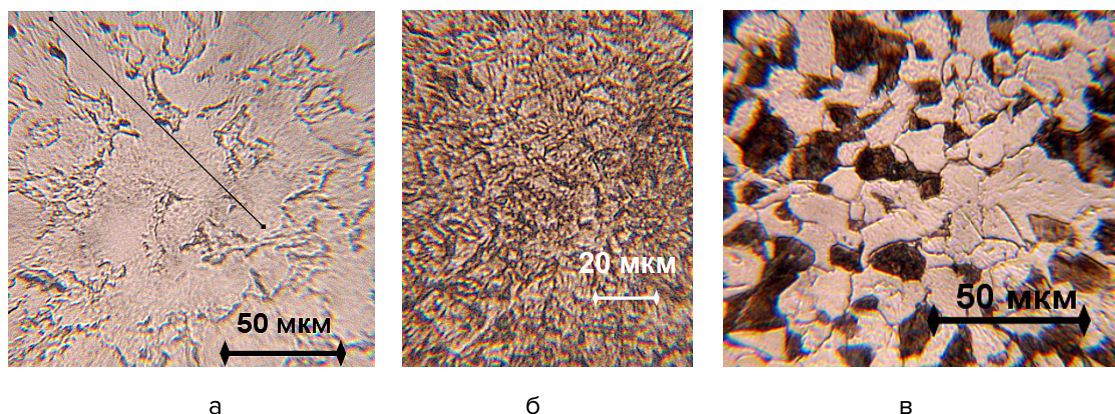


Рис. 2. Структура поверхностного слоя (а, б) и сердцевины (в) детали из стали 16MnGrS5, подвергнутой после науглероживания закалке ТВЧ и низкотемпературному отпуску

Морфология упрочненного слоя свидетельствует о возникновении значительного градиента свойств из-за присутствия остаточного аустенита, а также снижения вязкости металла из-за перегрева. Максимальное значение микротвердости – 7500 МПа отмечено на расстоянии около 400 мкм от поверхности. Твердость наружного слоя металла, содержащего повышенное количество остаточного аустенита снижена до значения 5500 МПа, что соответствует твердости по Роквеллу 52–53 HRC_с. Особенности строения и распределения микротвердости науглероженного слоя после закалки ТВЧ показывают, что основными причинами отслоения упрочненного слоя после проведения шлифования стали высокие по величине остаточные напряжения сжатия.

Совокупность всех технологических операций способствовала постепенному повышению их величины с достижением максимальных значений в момент проведения шлифования. Это обусловлено тем, что механическая обработка слоя, содержащего большое количество остаточного аустенита, сопровождается его динамическим старением и превращением в мартенсит. Большой удельный объем α -фазы усиливает внутренние деформации наружного слоя, вызывая его выпучивание, которое в процессе старения сопровождается отслоением металла. Дополнительным неблагоприятным фактором, снижающим прочность сцепления сердцевины и наружного слоя, явилось утонение последнего в процессе шлифования. В результате его собственная жесткость уменьшилась, и он потерял способность выполнять роль наружного банджа, имеющего достаточную конструкционную прочность.

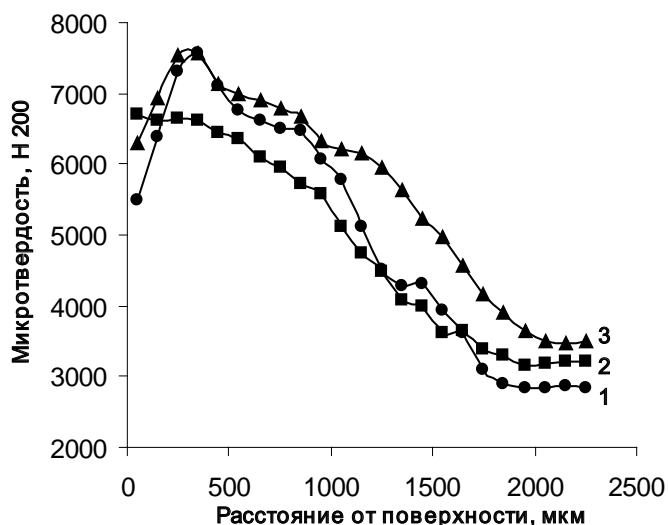


Рис. 3. Распределение микротвердости по сечению упрочненных слоев стали 16MnGr5S: 1 – закалка ТВЧ; 2 – объемная закалка с подстуживанием; 3 – нормализация после цементации с последующим повторным нагревом и объемной закалкой с температуры 840 °С

Очевидным техническим решением для улучшения структуры упрочненного слоя является проведение объемной закалки, которая позволяет достаточно точно проконтролировать температуру аустенизации металла перед его охлаждением. Особенности проведения объемной закалки обусловлены необходимостью повторной перекристаллизации сплава для измельчения его зерна. Для деталей ответственного назначения после цементации желательно охлаждение до комнатной температуры, чтобы последующий нагрев под закалку вызвал перекристаллизацию твердого раствора и способствовал измельчению зерна. В особых случаях с этой целью закалку повторяют дважды. Менее ответственные детали допускается подстуживать после цементации до температуры закалки и проводить её непосредственно после цементации [3]. Во втором случае высока вероятность получения более крупного действительного зерна вследствие его роста во время цементации. Однако меньшая трудоемкость закалки с подстуживанием является достаточно важным экономическим фактором для условий массового производства.

Исходя из вышеизложенного, термообработку цементованных образцов проводили по двум различным режимам. В первом случае закачивали детали с подстуживанием, снизив температуру в печи цементации до 840 °С и выдержав до начала закалки 30 минут. В качестве опытного образца использовали штатную деталь «Цапфа» N°КЗК-12-0 290 640, диаметр которой составлял около 30 мм. Во втором случае сразу после

цементации детали извлекали из печи и охлаждали на воздухе. После этого проводили повторный нагрев под закалку до 840 °С с выдержкой 30 минут и закаливали. В качестве завершающего перехода следовал отпуск 200 °С 1 час.

После закалки с подстуживанием поверхностный слой металла приобрел структуру среднеигльчатого мартенсита с равномерно распределенными кристаллами остаточного аустенита (рис. 4,а). Признаков перегрева не обнаружено. Последующее шлифование упрочненных деталей не сопровождалось возникновением подповерхностных трещин – все детали из партии соответствовали требованиям контроля качества.

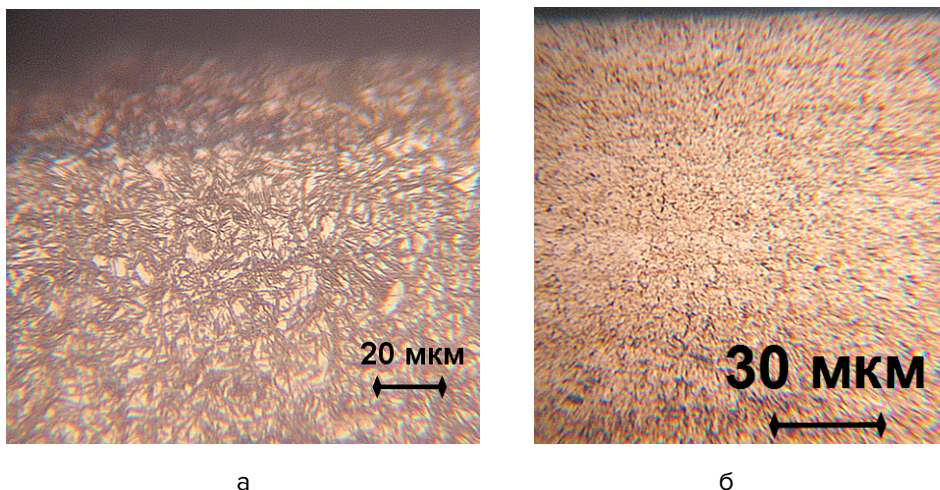


Рис. 4. Микроструктура цементованного слоя стали 16MnGrS5 после закалки с подстуживанием (а) и закалки, проведенной в качестве самостоятельного перехода термической операции (б)

Как видно из рис. 3, закалка с подстуживанием привела к достижению наименьшей твердости упрочненного слоя из всех исследованных вариантов. Она составила 6600 МПа, что соответствует 58 HRC₃ и является минимально допустимым значением для большинства технологических процессов термохимической обработки науглероженных деталей. Однако в данном случае технические требования на деталь «Цапфа» №КЗК-12-0 290 640 допускали получение твердости в диапазоне 52–53 HRC₃. Это позволило отдать предпочтение данной технологии, исходя из экономической целесообразности. Дополнительным преимуществом послужило получение на графике микротвердости площадки равной твердости на глубину не менее 400 мкм.

Отдельного внимания заслуживают результаты анализа структуры и распределения микротвердости в образцах, подвергнутых закалке после того, как цементация была завершена охлаждением на воздухе, или, по сути, нормализацией. Как видно из рис. 3, распределение микротвердости зафиксировало на поверхности сплава снижение данного показателя до уровня, соизмеримого с образцами, которые подвергались закалке ТВЧ. Аналогично им максимальная микротвердость на уровне 7500 МПа достигнута на глубине порядка 400 мкм. Распределение микротвердости по сечению сплава показывает, что объемная закалка как обособленный от цементации процесс позволяет достичь высокой твердости достаточно глубоких слоев металла, располагающихся на расстоянии от поверхностного слоя свыше 1 мм. Структура наружного слоя (рис. 4,б) отличается пониженной химической активностью, что может отражать как присутствие повышенного количества остаточного аустенита, так и проявление процесса обезуглероживания слоя при нагреве в воздушной среде под закалку. Поскольку с практической точки зрения детальное выявление указанного эффекта не требовалось его изучение запланировано в качестве дальнейших исследований.

Заключение

Полученные результаты показали, что в процессе термохимической обработки стали 16MnCr5 важным технологическим параметром является процедура закалки предварительно науглероженного металла. Применение закалки ТВЧ приводит к неконтролируемому перегреву поверхностного слоя детали, интенсивному росту аустеничного зерна и возникновению в нем высоких по величине остаточных напряжений сжатия. После окончания всех переходов термохимической обработки структура металлической матрицы упрочненного слоя содержит большое количество остаточного аустенита. Окончательная механическая обработка науглероженного слоя приводит к снижению его собственных прочностных характеристик. В процессе снижения толщины слоя величина остаточных напряжений сжатия превышает прочность сцепления слоя с сердцевиной, что провоцирует отделение поверхностного слоя от основы.

Применение объемной закалки, призванное устранить негативное влияние перегрева, выявило существенные различия в структуре и свойствах модифицированного слоя в случае проведения закалки непосредственно после науглероживания (с подстуживанием) и повторного нагрева металла, предварительного подвергнутого нормализации после цементации. Выявленные различия показали, что более экономичный режим обработки, включающий закалку с подстуживанием непосредственно после цементации, оказался предпочтительным по показателям структурообразования упрочненного слоя и формирования в нем благоприятного распределения микротвердости. Структура слоя отличалась равномерно распределенными по сечению кристаллами мартенсита 2–3 балла с небольшими аустенитными зернами без признаков ликвации. Распределение микротвердости характеризовалось графической зависимостью с зоной постоянной твердости. Финишное шлифование упрочненных деталей не сопровождалось возникновением подповерхностных трещин – все детали из опытной партии соответствовали требованиям контроля качества.

Объемная закалка, проведенная в качестве обособленной операции, после того как науглероженные образцы охлаждались на воздухе, привела к формированию в наружном слое зоны пониженной твердости на глубину не менее 300 мкм. В указанном слое после травления не выявлено мартенситного строения, что может объясняться процессами обезуглероживания, а также присутствия большого количества остаточного аустенита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перетягина, Е.А. ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга БМК»: визитная карточка Республики Беларусь. Знак качества. 2018; (1):6–9.
2. Ковалева, И.А. Разработка мероприятий по оптимизации химического состава в цементуемой марке стали 16MnCr5 для устранения причин возникновения роста крупных аустенитных зерен / И.А. Ковалева, И.А. Овчинникова, С.В. Стефанович // Литье и металлургия. 2019;(1):49–56.
3. Гуляев, А.П. Металловедение. Учебник для втузов. 6-е изд., перераб. и доп. / А.П.Гуляев, М.: Металлургия, 1986. 544 с.

REFERENCES

- 1.Peretyagina Ye.A. ОАО «BMZ» – upravlyayushchaya kompaniya kholdinga BMK»: vizitnaya kartochka Respubliki Belarus'. Znak kachestva, 2018. no.1, pp. 6–9. (in Russian)
2. Kovaleva I.A., Ovchinnikova I.A., Stefanovich S.V. Razrabotka meropriyatiy po optimiza-tsii khimicheskogo sostava v tsementuyemoy marke stali 16MnCr5 dlya ustraneniya prichin vznikno-veniya rosta krupnykh austenitnykh zeren [Development of measures to optimize the chemical composition in the cemented steel grade 16MnCr5 to eliminate the causes of the growth of large austenitic grains]. Lit'ye i metallurgiya. 2019. no.1, pp.49–56. (in Russian)
- 3.Gulyayev, A.P. Metallovedeniye [Metal science] Textbook for technical colleges. 6th ed, Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 10.05.2019