

УДК 621.785:669.14:621.83

А. Б. ЕДИНОВИЧ, А. В. КОЛОКОЛОВ, А. С. ТУРЕЙСКИЙ

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ДВОЙНАЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА ИЗ СТАЛИ ВКС-5

Выполнен процесс двойной или комбинированной химико-термической обработки детали из теплоустойчивой стали ВКС-5. Проведены сравнения с традиционными методами химико-термической обработки. Обсуждение разработанной технологии для получения двойной химико-термической обработки и результатов исследований. Показана эффективность путем металлографических исследований для определения качества деталей, изготовленных по разработанной технологии. Данная технология позволяет получить удовлетворительный результат с использованием оборудования для газового цементирования и газового азотирования.

Ключевые слова: двойная химико-термическая обработка, комбинированная химико-термическая обработка, азотирование, цементирование, ХТО, теплоустойчивые стали, ВКС-5.

Введение

С учетом тенденций увеличения нагрузки на зубчатые передачи первостепенной задачей является повышение контактной выносливости и износостойкости. Существует множество способов повышения этих свойств:

- разработка новых марок стали с улучшенными свойствами;
- улучшения технологии изготовления;
- применение двойной химико-термической обработки (ДХТО);
- использование антифрикционных покрытий, которые обеспечивают низкий коэффициент трения $\mu < 0,3$.

Основным способом повышения нагрузочной способности материала является применение ХТО, процесс представляет собой вид термообработки, который сочетает в себе тепловое и химическое воздействия, за счет которых происходит обогащение поверхности детали упрочняющим химическим составом. Однако, имеет значение состав металла, подвергающегося данному процессу, он влияет как на сам процесс, так и на результат. Важно при использовании ХТО принять во внимание и условия, в которых работает деталь, как пример, в прошлом был поднят такой вопрос как повышение теплоустойчивости стали, возникший в 60-годах, когда, были обнаружены структурные изменения на контактных поверхностях зубьев при температуре масла не выше 110 °С, такие структурные изменения были эквивалентны процессу отпуска при 300 °С. Таким образом, развитие технологий изготовления теплоустойчивых сталей дали возможность применять более вы-

сокие нагрузки и температуры на поверхности зубьев передач, в результате решения этой проблемы были созданы стали 14ХГСН2МА (ДИ-3А), 20Х3МВФА и 12Х2НВФА. Сталь 16Х3НВФМБ (ВКС-5, ДИ-39), разработанная в 70-х как заменитель стали 14ХГСН2МА (ДИ-3А) с более высокой теплоустойчивостью (до 350 °С), позволяющая сохранить прочность при высоких температурах. На основе этой стали были начаты работы по двойной или комбинированной химико-термической обработке, сочетающей в себе преимущества цементации и азотирования, при этом технология получения ДХТО нуждается в отработке при сочетании с обработкой на вторичную твердость.

Предприятием ГП «Ивченко-Прогресс» совместно с АО «МОТОР СИЧ» были проведены работы по исследованию технологии ДХТО стали ВКС-5 в применении к конкретным изделиям.

1. Анализ процессов ХТО сталей

Существует множество процессов ХТО: азотирование, цементирование, борирование, алитирование и т.д. В редукторостроении в основном применяется азотирование и цементирование. Цементирование – технологический процесс диффузионного насыщения углеродом поверхности, происходящий при температуре 900...1000 °С, в зависимости от марки металла, количество углерода на поверхности составляет 0,5...2 %, при этом твердость поверхностного слоя повышается до 750...950 HV, эффективная толщина цементируемого слоя (500 HV) может достигать 2 мм, в некоторых случаях 6 мм, при этом сердцевина остается вязкой с твердостью порядка 390 HV.

Азотирование- технологический процесс диффузионного насыщения азотом. Поверхностный слой азотируемых деталей обладает высокой твердостью порядка 1000...1200 HV и повышенной износостойкостью. Недостатком азотирования является малая эффективная толщина слоя, которая составляет от 0,15 до 0,7 мм, что, в свою очередь, ограничивает значение контактных нагрузок. Азотирование имеет особенность в виде образования на поверхности ϵ -фазы, которая повышает коррозионную стойкость, а при использовании металлов с содержанием активно нитридообразующих элементов этот слой имеет высокую твердость, что способствует увеличению контактной выносливости. Однако вследствие высокой прочности слоя ϵ -фазы, он имеет повышенную склонность к трещинообразованию, поэтому его глубина должна ограничиваться.

На основе этих двух методов ХТО был создан процесс цианирования (нитроцементация), представляющий собой одновременное насыщение поверхности как азотом, так и углеродом, при этом азот способствует лучшей диффузии углерода, поэтому температура, при которой происходит данный процесс, понижается до 850 °С, а износостойкость повышается по сравнению с обычной цементируемой сталью. Процесс зависит от соотношения количества азота и карбюризатора, приближаясь к цементированию либо к азотированию. К недостаткам цианирования относится повышенная опасность процесса, так как в нем задействованы ядовитые вещества, которые могут нанести серьезный ущерб здоровью организма и окружающей среде, кроме того глубина проникновения нитридов не превышает 0,3 мм.

Двойная или комбинированная химико-термическая обработка (ДХТО) разработана для повышения контактной выносливости сталей путем азотирования окончательно готовых деталей, которые перед этим были цементированы, закалены и протшлифованы.

Таким образом, ДХТО соединяет положительные качества двух процессов ХТО: большую глубину цементированного слоя и высокую твердость азотированного. Однако распространение ДХТО сдерживает необходимость применения теплостойких сталей, таких как М50NiL и ВКС-10, у которых происходит закалка на вторичную твердость при многократном отпуске при температуре практически равной температуре азотирования. В результате этого при азотировании не происходит разупрочнения [3]. С другой стороны, кроме указанных сталей, закаливаемых на вторичную твердость, имеются теплостойкие стали, например, ВКС-5, закаливаемые по традиционной технологии с одним отпуском. Работы по ДХТО ВКС-5 проводились в 1980-х

годах, однако они не получили развития вследствие разработки стали ВКС-10.

2. Способы получения ДХТО

Нами были рассмотрены некоторые способы получения процесса ДХТО, такие как: газовая цементация, газовое азотирование, жидкостное азотирование, ионное азотирование.

Изначально вместо газового азотирования нами было применено жидкостное азотирование, которое привело к понижению твердости. После были замечены расхождению показаний твердости по шкале RC с 59...60 HRC до 53...54 HRC, в то время как твердость по шкале RN15 оставалась неизменной 90...91HRN15, данный вопрос о причинах такого расхождения был изучен по результатам дальнейших исследований.

Металлографическое исследование образца подтвердило снижение твердости на поверхности по шкале HRC и HV (на глубине 0,2 мм твердость с 750 HV понизилась до 680 HV). При этом упрочненный слой представлял собой неоднородную карбидную сетку (рис. 1)

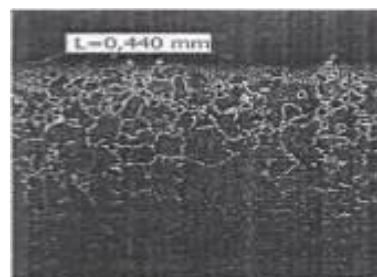


Рис. 1. Структура поверхности упрочнённого слоя металла

После проведения более качественного процесса цементации структура поверхностного слоя изменилась, карбидная сетка стала более однородной. Твердость упрочненного слоя на глубине от 0,6 до 1,6 мм стала ниже по отношению к стандартному цементированному (580 HV против 740 HV), структура поверхности представлена на рис. 2.

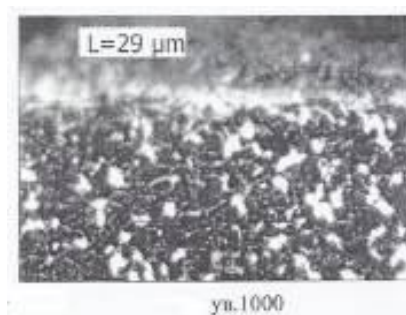


Рис. 2. Поверхностный слой образца (ϵ -фазы)

Замер твердости на поверхности стали ВКС-5 после ДХТО поднялся примерно до 100HV. Замер проводился с сохранением ϵ -фазы, которая позволяет повысить твердости (см. рис. 2).

В рамках исследования были также изучены возможности получения процесса ДХТО путем использования ионного азотирования, которое имеет ряд преимуществ, таких как:

- возможность использовать, в промежутке между процессами цементирования и азотирования, метод поверхностно пластических деформаций, создавая напряжения сжатия на поверхности [1];
- ионное азотирование позволяет регулировать толщину поверхностного слоя по строению и фазовому составу [2];
- меньшая продолжительность технологического цикла в 3-5 раз за счет уменьшения времени нагрева детали и охлаждения [2].

3. Результаты исследования

Исследования ДХТО проводились на образце зубчатого колеса (таблица 1).

Твердость определялась методом Виккерса, на расстоянии 0,1 мм от поверхности, в единицах HV, с

автоматическим переводом в единицы HRN15. Зоны замера микротвёрдости представлены на рис. 3.

Из приведенных результатов измерения микротвёрдости следует, что эффективная глубина упрочнённого слоя, соответствующая 500 HV, составляет:

- со стороны профилей – 1,5 мм;
- со стороны вершины – 1,75 мм;
- со стороны впадины – 1,25 мм.

Микроструктура упрочнённого слоя представляет собой:

- с поверхности имеется ϵ -фаза толщиной $\sim 0,02...0,03$ мм (рис. 3, а, б, в)
- далее по глубине располагаются мартенсит, избыточные карбиды и тонкие избыточные нитриды, расположенные на глубине $\sim 0,029$ мм от границы ϵ -фазы (рис. 3);
- далее по сечению – мартенсит и избыточные карбиды.

Суммарная глубина зоны с наличием ϵ -фазы, избыточных нитридов и наибольшей концентрации избыточных карбидов составляет:

- со стороны вершины и профилей $\sim 0,29...0,30$ мм;
- со стороны впадины $\sim 0,17$ мм.

Таблица 1

Твердость и общая глубина упрочнённого слоя зубчатого венца

Твёрдость		Глубина слоя в мм.
Поверхность	Сердцевина	
59 HRC 89HRN15	42HRC	1,96 мм
851 HV(~ 92 HRN15) 782 HV(~ 91 HRN15)		2,07 мм
829 HV(~ 92 HRN15)		1,93 мм

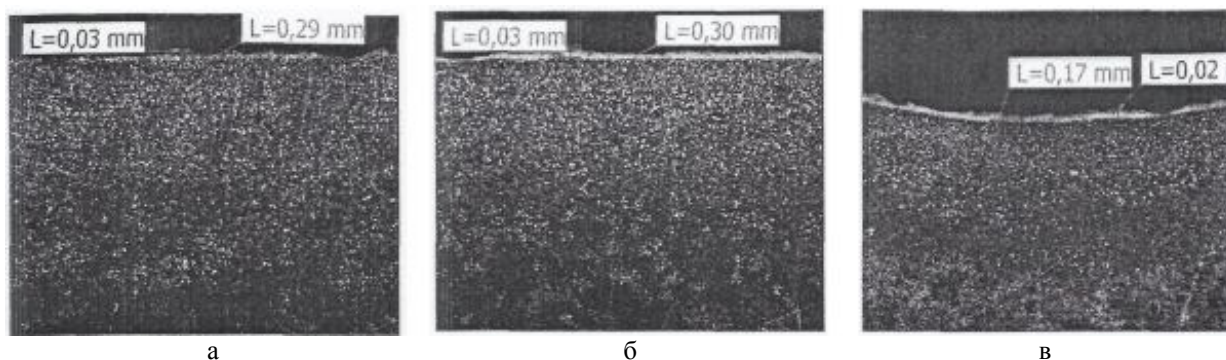


Рис. 3. Микроструктура на глубине $\sim 0,029$ мм от границы ϵ -фазы:
а – вершина, б – профиль, в – впадина

Выводы

При цементации стали ВКС-5 с низким отпускком на 300°C , твердость по слою плавно снижается

от 750 HV до 700 HV в пределах половины глубины слоя с дальнейшим снижением до эффективной твердости (500 HV) (рис. 4).

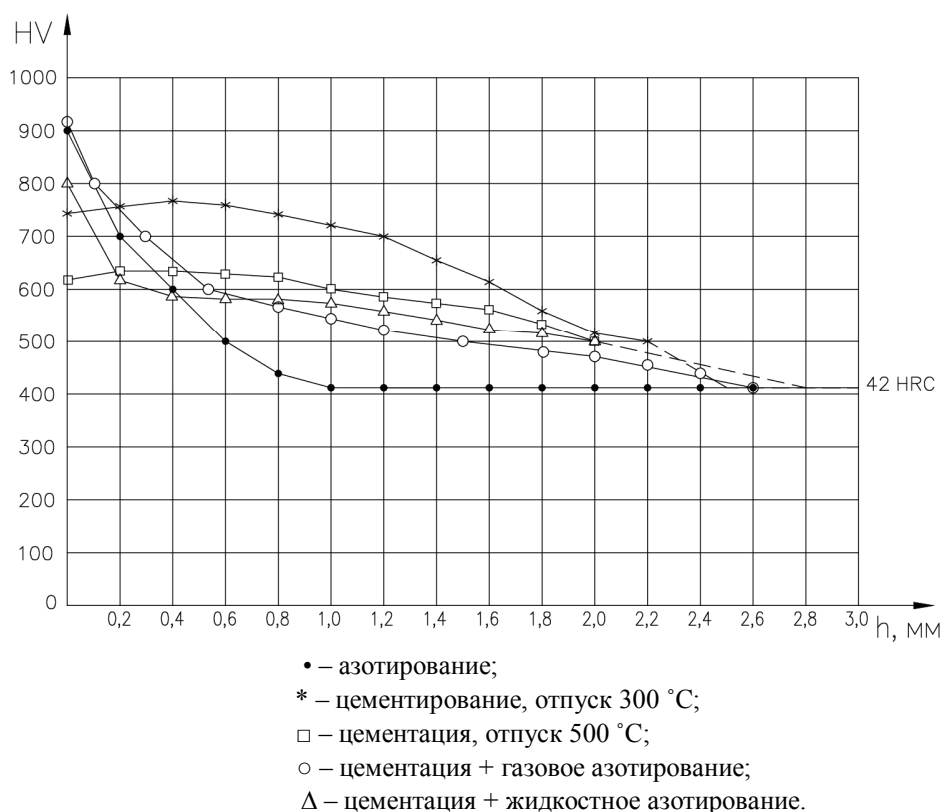


Рис. 4. Изменение твердости упрочненного слоя

При цементации с низким отпуском на 530 °С, твердость по слою непрерывно снижается от 600 HV до 500 HV в пределах глубины слоя.

При азотировании стали ВКС-5, твердость по слою непрерывно снижается от 900 HV до 500 HV в пределах глубины слоя.

При двойном ХТО стали ВКС-5 кривая падения твердости повторяет последовательно кривые падения твердости при азотировании и далее, как при цементации с отпуском на 30 °С.

Заключение

Двойная или комбинированная химико-термическая обработка (цементация и газовое азотирование) стали ВКС-5 может быть рекомендована для повышения контактной выносливости крупногабаритных венцов зубчатых колес с модулем больше 2,5 мм.

При ДХТО шлифовка поверхностей после азотирования нецелесообразна по причине снижения, в связи с этим, твердости на поверхности и малой, по сравнению с чистой цементацией, твердостью на глубине.

Литература

1. Оценка характеристик упрочнения теплоустойчивой стали, подвергнутой комбинированной химико-термической обработке [Текст] / М. Ю. Семенов, Р. С. Фахуртдинов, М. М. Лашинев, В. И. Громов, П. Н. Демидов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2013. – № 7. – С. 3–9.
2. Ионная химико-термическая обработка сплавов [Текст] : монография / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. – М. : Изд-во МГТУ им Н. Э. Бумана, 1999. – 400 с.
3. *Авиационное материаловедение и технология обработки металлов* [Текст] : учеб. пособие для авиационных вузов / Н. В. Абрамов [и др.] ; Под ред. Н. А. Абрамова. – М. : Высш.шк., 1998. – 444 с.

References

1. Semenov, M. Yu., Fakhurtdinov, R. S., Lashnev, M. M., Gromov, V. I., Demidov, P. N. Otsenka harakteristik uprochneniya teplostoykoy stali, podvergnutoy kombinirovannoy khimiko-termicheskoy obrabotke [Qualification performens hardened hot-work steel exposed to combination of heat treatment]. *Metallovedeniyei termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 7, pp. 3-9.

2. Arzamasov, B. N., Bratukhin, A. G. Eliseyev Yu. S., Panayoti, T. A. *Ionnaya khimiko-termicheskaya obrabotka. Splavov* [Ionic heating treatment of alloy]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bumana, 1999. 400 p.

3. Abramov, N. V., Eliseyev, Yu. S., Krymo, V. V. *Aviatsionnoye materialovedeniye i tekhnologiya obrabotki metallovkh* [Aviation materials science and metal-working technology]. Moscow, "Visshaya shkola" Publ., 1998. 444 p.

Поступила в редакцию 05.06.2018, рассмотрена на редколлегии 27.07.2018

ПОДВІЙНА ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЗУБЧАСТОГО КОЛЕСА ІЗ СТАЛІ ВКС-5

А. Б. Єдинович, О. В. Колоколов, А. С. Турейський

Виконано процес подвійної хіміко-термічної обробки деталі з теплостійкою сталі ВКС-5. Проведено порівняння подвійний хіміко-термічної обробки з традиційними методами хіміко-термічної обробки. Обговорення розробленої технології для отримання подвійної хіміко-термічної обробки і результатів досліджень. Показана ефективність шляхом металографічних досліджень розробленої технології. Дана технологія дозволяє отримати задовільний результат з використанням обладнання для газового цементування і газового азотування.

Ключові слова: подвійна хіміко-термічна обробка, комбінована хіміко-термічна обробка, азотування, цементация, ХТО, теплостійкі сталі, ВКС-5.

DOUBLE CHEMICAL-THERMAL TREATMENT GEARS FROM STEEL VKS-5

A. B. Edinovich, A. V. Kolokolov, A. S. Tureyskiy

The process of the double chemical-thermal treatment (DCTT) a gear made of heat-resistant steel VKS-5 is quite common and makes it possible to obtain secondary hardness. Double or combined chemical-thermal treatment is designed to increase the contact durability of steels by nitriding final finished parts that these were carburizing, hardened and ground. Comparison of the process of double chemical-thermal treatment with traditional methods of chemical-thermal treatment (CTT) carburizing and nitriding. Object of the study is a gear wheel treated with the DCTO method, after it was compared the hardness of the wheel past the DCTO using gas nitriding and liquid, with other similar CTT processes such as nitriding and carburizing and nitrocarburizing the results were a graph of hardness and the depth of the strengthened layer for each of the processes. Discussion of the developed technology for the preparation of double chemical-thermal treatment and the results of studies on the use of dispensing methods for obtaining DCTO. Efficiency is justified by metallographic studies of the developed technology. Also, metallographic studies have shown the need to control the surface layer the E-phase is formed due to which it is possible to substantially increase the hardness of the surface while preserving the structure of the entire material without cracking thereby providing increased contact durability. We also consider the possibility of using ion-plasma equipment, which allows to significantly increase the speed of the process, control the thickness of the layer of surface phases and also makes it possible to additionally apply the method of surface deformation to create compressive stresses on the surface. This technology allows to obtain a surface combining the advantages of nitriding and carburizing, excluding using harmful substances affecting a health and ecology, and also economically more beneficial than nitrocarburizing. DCTT can be used to increase the contact endurance of the gear wheels in a large module, and eliminating the need for further machinery treatment of the surface layer after DCTT.

Keywords: double chemical-thermal treatment, combination chemical-thermal treatment. nitriding, carburization, CTT, hot-work steel, DCTT.

Єдинович Андрей Борисович – ведущий инженер-конструктор, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03511@ivchenko-progress.com.

Колоколов Александр Владимирович – инженер-конструктор 3 кат., ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: aleksanderkolokolov@gmail.com, 03511@ivchenko-progress.com.

Турейский Андрей Сергеевич – инженер, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: tasprogress@i.ua.

Edinovich Andrey Borisovich – leading designer, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03511@ivchenko-progress.com.

Kolokolov Aleksandr Vladimirovich – third category designer, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: aleksanderkolokolov@gmail.com, 03511@ivchenko-progress.com.

Tureyskiy Andrey Sergeevich – engineer, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tasprogress@i.ua.