

Д.Д. ГОСПОДИНОВ, д-р, гл. ассистент, каф. МТМ, Русенский университет им. Ангела Канчева, Русе, Болгария;
Д.С. СТАВРЕВ, д.т.н., профессор, каф. МТМ, Технический университет, Варна, Болгария

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИ ЗАКАЛКЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ВАКУУМЕ

В работе представлены результаты исследования стадии охлаждения в процессе закалки погружением в масло в условиях пониженного давления в вакуумных печах. Основной целью является изучение влияния вакуума и повышенного давления на охлаждающую способность вакуумных масел. Установлено, что понижение давления в камере охлаждения ведет к значительному снижению охлаждающей способности среды. В связи с этим, при закалке зубчатых колес и валов из низколегированных конструкционных сталей получается пониженная твердость, неполная прокаливаемость. Наличие таких отклонений в качестве деталей, ведущих к снижению долговечности и надежности передач, недопустимо. В связи с этим были сделаны исследования и предложены решения, связанные с интенсификацией процесса теплоотвода из деталей в окружающую масляную среду. В работе представлены результаты повышения теплоотводящей способности исследуемых масел путем повышения давления в камере охлаждения, интенсивного турбулентного размешивания и использования разных температур охлаждающих масел.

Ключевые слова: термическая обработка, охлаждающая способность, вакуум, давление, зубчатые передачи

Введение, анализ литературы. Закалка деталей зубчатых передач после нагрева среднеуглеродистых или после цементации низкоуглеродистых сталей в вакууме – одно из перспективных направлений современной технологии упрочнения.

Применение специальных вакуумных масел связано со специфическими требованиями к условиям охлаждения, чтобы удовлетворить условия качественного упрочнения низколегированных конструкционных сталей. Одновременно с этим фирмы начали выпуск вакуумного оборудования с охлаждением газами высокого давления и большой скоростью обтекания деталей в камере охлаждения. Из-за высокой стоимости нового оборудования внимание сосредоточивается в области интенсификации охлаждения в масляных ваннах камеры охлаждения вакуумных установок. При этом существуют противоречивые мнения о качестве разных марок масел [1-4]. Независимо от больших скоростей и давления (до 20 бар) охлаждающих газов [5], скорость охлаждения не достигает значений, получаемых при охлаждении в масле.

По этому использование газоохлаждаемых вакуумных установок для закалки улучшаемых и цементуемых сталей, применяемых для конструкции зубчатых передач, нецелесообразно и неприемлемо. Преимущества упрочнения в вакууме надо использовать для достижения высокого качества и долговечности. Это требует подробного изучения охлаждающей способности (ОС) используемых масел для закалки в камере охлаждения при разных давлениях.

Первичные кривые охлаждения в условиях различного давления дают важную информацию о его влиянии на охлаждающую способность масла и пригодность для каждого конкретного случая (изделия, материала).

В условиях охлаждения при атмосферном давлении для интенсификации охлаждения применяют размешивание разной интенсивности и правильный выбор и

регулирование температур масла [7].

Несмотря на то, что в литературе встречаются сведения о понижении охлаждающей способности масла в вакууме, данные для сходства влияния температуры и размешивания в условиях вакуума и нормального атмосферного давления отсутствуют. Значительная степень влияния давления на ОС дает возможность для коррекции теплообмена в процессе охлаждения при закалке в вакуумных сооружениях.

Цель работы. Целью является исследование охлаждающей способности вакуумного масла Durixol H222 при разных давлениях, температуре и турбулентном размешивании для создания подходящих условий при закалке улучшаемых и цементуемых низколегированных сталей, применяемых при конструировании зубчато-приводных механизмов.

Методика. Исследование проведено в однокамерной, двухзонной, вертикальной лабораторной вакуумной установке. Методика регистрирования данных и обработки информации в стадии охлаждения подробно описана в [9, 10]. Нагреваемая зона связана с зоной охлаждения посредством отверстия, через которое спускается нагретое до предварительно выбранной температуре (в случае 850°C) пробное тело. Оно из меди (Cu 99.880). Имеет форму сферы диаметром Ø20 mm. Термоэлемент (хромель-алюмель, типа "К") припаян в центре сферы.

В камере охлаждения помещена ванна цилиндрической формы, вместимостью 1,2 dm³, в которой находится 1dm³ исследуемого флюида. Ванна располагает возможностью нагрева флюида до предварительно выбранной температуры и размешивания ламинарными и турбулентными потоками в разных режимах. Размешивание реализуется витловыми мешалками самостоятельной задвижки и с помощью возможности бесступенного регулирования частоты кручения. Исследовано минеральное вакуумное масло для закалки Durixol H222, фирмы Burgdorf KG, Германия. Используется в качестве быстроохлаждающего масла для светлой закалки в условиях низкого давления. Можно беспроблемно применять его для закалки инструментов из высоколегированных сталей. При определенных условиях возможна закалка деталей из средне- и низколегированных сталей включительно после вакуумной цементации. Масло имеет кинематический вискозитет 20 mm²/s при 40°C и температуру плавления 196°C.

Уровней изменения давления для исследования влияния на ОС – пять. Низкий уровень исследованного давления выбран в соответствии с использованными в практике давления для вакуумных установок в области среднего вакуума. Первый уровень исследования – атмосферное давление (P_{atm}). Исследование охлаждающей способности при таком давлении используется как база сравнения для остальных уровней варьирования – p = 1 mBar, 500mbar, 0,1 и 0,15 МПа. Повышение давления в камере охлаждения осуществлено путем натечки аргона.

Вакуумная установка для термической обработки предлагает дополнительную возможность влияния на кинетику охлаждения посредством изменения давления в камере охлаждения. Она связана с повышением давления без особых затруднений. При этом давление можно менять в процессе охлаждения. Повышение давления осуществляется до начала охлаждения сферического воспринимателя. Уровни повышенного давления остаются постоянными до конца процесса охлаждения (около 100°C).

Влияние температуры при двух уровнях изменения установлено для комнат-

ной (20°C) и рабочей (60°C) температуры в соответствии с регламентами фирмы Burgdorf KG для оптимального температурного интервала применения для заковки.

Влияние размешивания масла исследовано в статических условиях (без размешивания) и при турбулентном размешивании, интенсивность которого определена относительной мощностью, измеряемой на схеме подключения электродвигателя пропеллерной мешалки ($P = 13 \text{ W/dm}^3$).

Кроме интегральной оценки охлаждающей способности, получаемой после записи первичной кривой охлаждения в координатах температура-время и ее дифференцирования, описывающей скорости охлаждения в исследованном температурном интервале (850 до ~100°C), в работе использованы и выбраны локальные оценки охлаждающей способности (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики охлаждающей способности (ОС) масел в стадии охлаждения погружением

Наименование характеристики	Обозначение
Максимальная скорость охлаждения	$V_{\max}, ^\circ\text{C/s}$
Температура максимальной скорости охлаждения	$T(V_{\max}), ^\circ\text{C}$
Средняя скорость охлаждения в перлитном интервале (650-550 °C)	$V_p, ^\circ\text{C/s}$
Средняя скорость охлаждения в мартенситном интервале (370-200 °C)	$V_m, ^\circ\text{C/s}$

Результаты исследований. На рис.1 представлены результаты исследования скорости охлаждения масла Durixol H222 при давлении в камере охлаждения от 1mBar до 0.15 МПа. Полученные кривые охлаждения при атмосферном давлении подтверждают информацию Производителя для применения масла в качестве быстро охлаждающего.

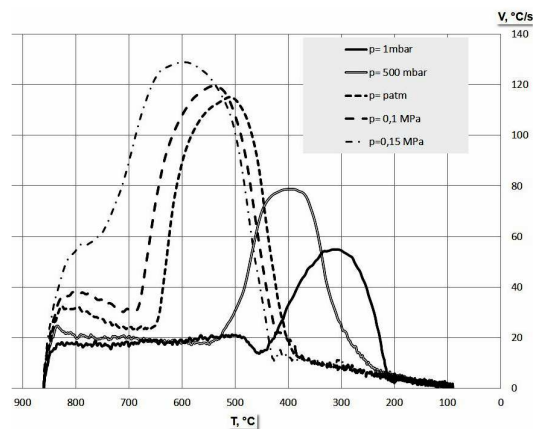


Рисунок 1 – Изменение скорости охлаждения масла в погруженном пробном образце при изменении давления от $p = 1 \text{ mbar}$ до 0,15МПа. Начальная температура 20°C, без размешивания

увеличение продолжительности стадии образования паровой рубашки, снижение скорости охлаждения и интенсивности теплоотвода и в результате – значительное

снижение максимальной и средней скорости охлаждения в стадии интенсивного кипения (см. рис. 1).

При давлении 1 mBar наблюдается anomalous поведение масла по отношению к скорости охлаждения как в перлитном, так и в мартенситном интервале. В мартенситном интервале скорость больше, чем в перлитном. Такое поведение характерно для охлаждения в воде или в водных растворах.

Наблюдаемое изменение характеристик теплоотвода приводит к невозможности закаливать на мартенсит стали с низкой устойчивостью переохлажденного аустенита и к нарастанию вероятности получения значительных напряжений и деформаций при охлаждении.

Результаты исследования показывают, что повышение давления оказывает положительный эффект на характеристику охлаждающей способности (см. табл. 2 и рис. 1). Почти полностью исчезает стадия паровой рубашки и нарастает

средняя скорость охлаждения по сравнению с охлаждением при атмосферном давлении. Стадия интенсивного кипения попадает в целом в перлитный температурный интервал превращения аустенита, что является одним из необходимых условий для получения мартенситных структур и повышения прокаливаемости термообрабатываемых изделий.

Таблица 3 – Оценки ОС масла Durixol H222 при $T=60^\circ\text{C}$, турбулентное размешивание

оценки	1 mbar	500 mbar	Patm	0,1 MPa	0,15 MPa
$V_{\max}, [^\circ\text{C/s}]$	64,7	104	132,5	155	141
$T(V_{\max}), [^\circ\text{C}]$	327	407	503	557	594
$V_p, [^\circ\text{C/s}]$	20,4	35,2	101	143,5	138,8
$V_m(370), [^\circ\text{C/s}]$	43,5	44,7	22,5	22,4	25,1

На рис. 2 и в табл. 3 показаны результаты, полученные при повышении температуры масла до 60°C и размешивании в турбулентном режиме. При сопоставлении результатов с представленными на рис. 1 видно, что размешивание и повышенная температура способствуют дополнительному улучшению характеристик охлаждающей спо-

Таблица 2 – Оценки ОС масла Durixol H222 при $T=20^\circ\text{C}$, без размешивания

оценки	1 mBar	500 mBar	Patm	0,1 MPa	0,15 MPa
$V_{\max}, [^\circ\text{C/s}]$	54,9	78,7	115,2	119,5	129
$T(V_{\max}), [^\circ\text{C}]$	306	403	510	544	602
$V_p, [^\circ\text{C/s}]$	18,8	18,3	64,8	98,4	126,7
$V_m, [^\circ\text{C/s}]$	33	21	7,5	7,25	7,8

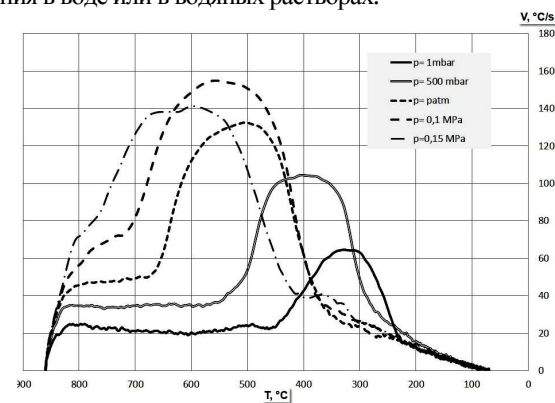


Рисунок 2 – Изменение скорости охлаждения исследуемого масла в зависимости от температуры при изменении давления от $p = 1 \text{ mBar}$ до 0,15МПа, начальная температура масла- 60°C, турбулентное размешивание

способности. Наблюдается сокращение продолжительности первой стадии охлаждения при нарастании средних скоростей охлаждения в нем. В результате получается дополнительное повышение скорости охлаждения в перлитном участке и увеличение глубины прокаливаемости. Основным недостатком турбулентного размешивания является нарастание средней скорости охлаждения в мартенситном температурном интервале. Эффект наблюдается при всех уровнях изменения давлений, поэтому необходимо прервать турбулентное размешивание посредством понижения скорости размешивания ламинарными режимами.

На рис. 3 представлена термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали 16ХГ с наложенными кривыми охлаждения, полученным в условиях эксперимента. Видно, что при повышении давления выше 500 mBar твердость на поверхности после охлаждения повышается до 400-412HV. Одновременно с этим вследствие повышенной скорости теплоотвода прокаливаемость заметно увеличивается. Это имеет особенно значение для крупногабаритных деталей для упрочнения после цементации.

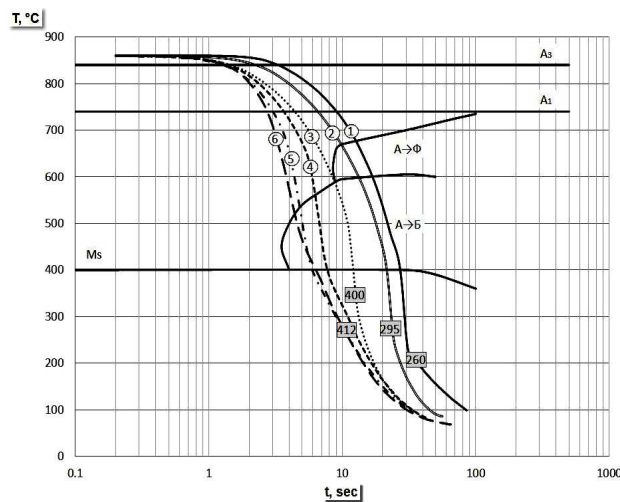


Рисунок 3 – Термокинетическая диаграмма стали 16ХГ (ГОСТ) [11] с наложенными первичными кривыми охлаждения:
1 – $p = 1 \text{ mBar}$, $T = 20^\circ\text{C}$, без размешивания;
2 – $p = 1 \text{ mBar}$, $T = 60^\circ\text{C}$, размешивание;
3 – $p = 500 \text{ mBar}$, $T = 60^\circ\text{C}$, размешивание;
4 – $p = p_{\text{atm}}$, $T = 60^\circ\text{C}$, размешивание;
5 – $p = 0,1 \text{ MPa}$, $T = 60^\circ\text{C}$, размешивание;
6 – $p = 0,15 \text{ MPa}$, $T = 60^\circ\text{C}$, размешивание

Выводы. Результаты исследования охлаждающей способности масла показывают, что понижение давления в камере охлаждения при вакуумной термической обработке способствует заметному снижению его охлаждающей способности. На основании этого закалку конструкционных сталей обязательно следует вести при повышенном давлении. Первичная кривая охлаждения при низком давлении (1 mBar) показывает, что при этом давлении невозможно осуществлять закалку низколегированных конструкционных сталей невысокой прокаливаемости для деталей механических приводов.

Большую степень влияния давления в камере охлаждения можно с успехом использовать для повышения охлаждающей способности в желаемом направлении. Повышая давление в стадиях охлаждения, можно в динамическом режиме управлять процессом и оптимизировать свойства обрабатываемых деталей в зависимости от конкретных условий (материал, форма, размер, требования)

Проведенные исследования и полученные результаты показывают, что правильный выбор вакуумного масла для закалки в условиях вакуумной термообработки недостаточен для гарантирования качества. Необходимо комбинировать охлаждение с натечкой газов в камере охлаждения при достижении давления не меньше 500 mBar, при предварительном подогреве масла и интенсивном размешивании до начала интервала мартенситного превращения.

Список литературы: 1. Мармер Э., Вислобоков В., Мурованная Г. Охлаждающая способность некоторых вакуумных масел при различных разрежениях // *MuTOM*. – 1983. – №1. – С.14-16. 2. Liščić B., Tensi H., Luty W. (Eds.), Theory and Technology of Quenching, Handbook, – Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1992. – 484 с. 3. J. Pritchard, Advanced Techniques For Distortion Control During Vacuum Oil Quenching // *Furnaces International*, May/June 2007. 4. J. Pritchard S. Rush, Vacuum Hardening High Strength Steels: Oil Versus Gas Quenching // *Heat Treating Progress*, May/June 2007, volume 7, number 3. 5. Herring D., Sugiyama M., Uchi-gaito M. Vacuum Furnace Oil Quenching – Influence of Oil Surface Pressure on Steel Hardness and Distortion, *Industrial Heating* – June, 1986, P. 14-17. 6. Kazuhiko K. Vacuum Quenching Furnace Using High Pressure Gas // *Engineering Review*. August 2005. – Vol. 38. – No. 2. – P.12-17. 7. <http://www.wpi.edu/Images/CMS/MPI-CHTE/gasquenching1.pdf> – 24.07.2013. 8. <http://www.ipsenusa.com/pdfs/library/TurboBRO2007.pdf> – 24.07.2013. 9. Danev Pl., Radeva R., PC Integrated Installation for Studying of the Cooling Ability of Fluids for Hardening at Lowered Pressure (Vacuum) // *Proceedings of the 8-th Seminar of the International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering IFHTSE 2001, Dubrovnik-cavtat, Croatia, 2001, P.124-129*. 10. Danev Pl., Radeva P., Борисов Б., Стойков Д., Разработване на компютърна система за регистриране на кривите на охлаждане на течни среди за закаляване и изследване на подходи за математическа обработка // *Трудове на Научна сесия 2001 на „ПВ А. Кънчев“, гр. Пусе, 2001. – С.53-58*. 11. Rose A., Peter W., Strassburg W., Rademacher L. Atlas zur wärmebehandlung der stähle. Teil II. – Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1972. – P.149-151.

Поступила в редколлегию 27.05.2014

УДК 621.85

Новые возможности при закалке зубчатых колес в вакууме / Д.Д. Господинов, Д.С. Ставрев // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР.* – Х.: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 29 (1072). – С.38-43. – Бібліогр.: 11 назв. ISSN 2079-0075.

В цій роботі представлені результати дослідження стадії охолодження в процесі загартування зануренням у масло, за умови зниженого тиску у вакуумних печах. Основною ціллю є вивчення впливу вакууму та підвищеного тиску на охолоджуючу здатність вакуумних масел. Було встановлено, що зниження тиску в камері охолодження призводить до значного зниження охолоджуючої здатності середовища. У зв'язку з цим, при загартуванні зубчастих колес та валів з низколегированих конструкційних сталей виходить знижена твердість та неповне каління. Наявність таких відхилень в якості деталей, які призводять до зниження довговічності та надійності, неприпустима. У зв'язку з цим були зроблені дослідження та затвердженні рішення, пов'язані з інтенсифікацією процесу тепловідводу від деталей до навколишнього масляного середовища. В роботі представлені результати підвищення тепловідводжучої здатності досліджуваних масел шляхом підвищення тиску в камері охолодження, інтенсивного турбулентного розмішування та різних температур охолоджуючих масел.

Ключові слова: термічна обробка, охолоджувальна здатність, вакуум, тиск, зубчасті передачі

The paper presents the study of the cooling stages of quenching under low pressure in vacuum furnaces. The subject is the impact of vacuum and increased pressure on the cooling properties of vacuum oils. Observed was that decreasing the pressure in the cooling chamber results in considerable lowering of the cooling properties of the medium. As a result, in quenching low-alloy structural steel gear wheels and shafts low hardness and insufficient hardness penetration was obtained. The existence of such violations in the quality of pieces leading to lowering the durability and reliability of gear drives is impermissible. For this reason studies have been carried out and solutions concerning the intensification of the process of heat abstraction out of the piece into the surrounding oil medium have been suggested. The paper also presents the results of the heat abstraction property of the oils under consideration obtained by increasing the pressure in the cooling chamber, intensive turbulent mixing and by using cooling oils of different temperatures.

Keywords: cooling properties, gear drives, pressure, thermal processing, vacuum