

16. Мерзликин В.Г., Худяков С.В., Предигер В., Сажин С.С. Оптимизация спектральных характеристик терморadiационных источников и облучаемых сред и материалов в природе и технике. М.: Сб. трудов межд. научно-практ. конф. «Инновации: перспективы, проблемы, достижения» под ред. А.А. Гажура. Разд. 3 «Инновации в организации и управлении производством, образованием и наукой». 27 мая 2013 г. ISBN 978-5-81215-1889-6. С. 371 – 382.
17. Мерзликин В.Г., Бекаев А.А., Сутугин В.Г., Кузнецов Ю.А. Полупрозрачное теплозащитное покрытие с отражающим оксидированным подслоем. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. №4, 2012. С. 16-29.
18. Товстоног В.А., Мерзликин В.Г. Методика и программное обеспечение для расчета радиационных и температурных полей плоских образцов многослойных полупрозрачных материалов при сложной радиационно-конвективной тепловой нагрузке. М.: МГТУ «МАМИ», электронное учебное пособие, ISBN 5-94099-031-2, 2004.
19. Takeshi Sugihara, Kenjiro Shimano, Yoshiteru Enomoto, Yasuko Suzuki, Masahiko Emi. Direct Heat Loss to Combustion Chamber Walls in a D.I. Diesel Engine. - 8th Int. Conf. on Engines for Automobile - ICE2007, 16 September. 2007. - Capri - Naples, Italy. Book of abstracts, 2007. P. 6. - Conference CD-ROM, paper № 2007-24-0006, p.p. 12.
20. Имитация космического полета [Электронный ресурс]. URL: http://astronaut.ru/bookcase/books/sharp01/text/26.html?reload_coolmenus
21. Космос начинается на Земле [Электронный ресурс]. URL: <http://vbega.ru/book/e2e28ed.html>.
22. Комплекс стендов и оборудования ЦСКБ “Прогресс” для исследования и испытания КА и их систем [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sumspace.ru>.
23. ОАО “НПО “Молния”. Лабораторная и стендовая база [Электронный ресурс]. URL: tehotdel@npomolniya.ru; molniya@npomolniya.ru.
24. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний объектов аэрокосмической техники. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № 1. С. 57 – 70.
25. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Особенности моделирования тепловых режимов крупногабаритных космических. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № 3. С. 22 – 32.
26. Товстоног В.А., Томак В.И., Цветков С.В., Чирин К.В. Экспериментальный комплекс для теплопрочностных испытаний материалов и элементов конструкций при высокоинтенсивном нагреве. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2009. № 1. С.67–76.
27. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2001. № 4. С. 3–32.
28. Merzlikin V., Eliseev V., Gazhur A., Prediger V. Stand modeling of radiant and convective impact for the heat-insulated combustion chamber. FISITA World Automotive Congress. Maastricht, 01 – 06 June 2014, congress CD-ROM, paper № F2014-CET-143, p.p. 1 - 8.

Опыт закалки хромистых сталей в вакууме

к.т.н. доц. Овсянников Б.Л., к.т.н. доц. Васильевский В.В., к.т.н. доц. Куломзин Е.К.

МИЭМ НИУ ВШЭ

8(499)-235-20-87, obl_d@mail.ru, 8(499) - 235-12-23, vvasil@hse.ru, ekulomzin@hse.ru

Аннотация. Изложен опыт и результаты исследований режимов закалки изделий из стали 40X13 в вакууме, в единичном и мелкосерийном производстве. По-

казана эффективность высокотемпературной закалки деталей с охлаждением вакуумной камеры на открытом воздухе. Разработана математическая модель охлаждения вакуумной камеры, позволяющая исследовать режимы охлаждения и варианты конструкции вакуумной камеры.

Ключевые слова: термообработка, закалка, отпуск, вакуум, математическая модель.

В развитии современного производства можно отметить, по крайней мере, две тенденции. Взрывное расширение номенклатуры деталей и связанное с этим развитие мелкосерийного и единичного производства. Проникновение в эти производства технологий, ранее считавшихся высокими: электронной, ионной вакуумной и лазерной техники, что связано с совершенствованием технологического оборудования [1]. В статье излагается опыт вакуумной закалки заготовок из высоколегированной коррозионностойкой хромистой стали 40X13, предназначенных для мелкосерийного производства медицинских инструментов и результаты математического моделирования процессов охлаждения деталей в вакууме.

Заготовки представляют собой круглые стержни диаметром 6 мм и длиной 110 мм. По техническим условиям они должны закаливаться до твердости 50-55 HRC. Обычно рекомендуемый режим термообработки для стали 40X13: нагрев до температуры 1000-1050°C в течение 15-20 минут, с охлаждением в масле и немедленным отпуском при 200-300°C [2]. При этом достигается твердость 60 HRC. После такой закалки изменяется цвет и ухудшается качество поверхности изделий, поэтому возникает необходимость дополнительной обработки.

Закалка изделий в вакууме, как известно [1, 2], не только не ухудшает поверхности деталей, но и производит их некоторую очистку. Это позволяет устранить последующую механическую обработку деталей и существенно снизить трудоёмкость их изготовления. В Московском институте электроники и математики (МИЭМ) в «Лаборатории вакуумной техники» под руководством доцента Куломзина Е.К. была разработана простая установка для вакуумной закалки малых партий таких изделий (рисунок 1). При этом был использован опыт отечественных и зарубежных разработчиков [3, 4, 5].

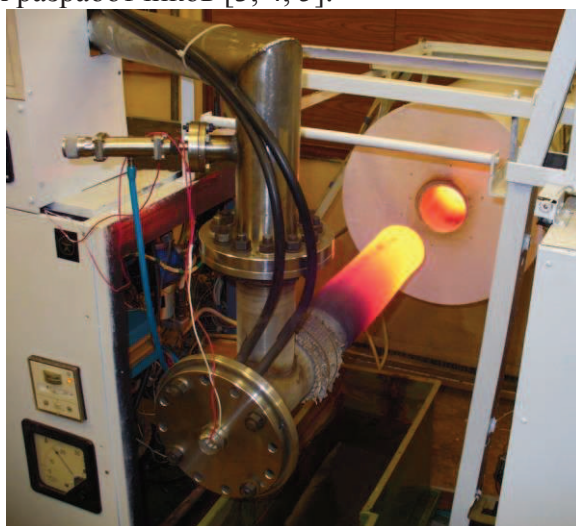


Рисунок 1. Общий вид установки вакуумной закалки

Установка состоит из цилиндрической рабочей вакуумной камеры (ВК), изготовленной из жаропрочной нержавеющей стали толщиной 5 мм; вакуумной системы, обеспечивающей высокий вакуум до 10^{-3} ПА; электропечи и средств, позволяющих осуществлять различные режимы охлаждения. Предусмотрены также возможность напуска аргона в рабочую камеру и возможность измерения температуры закаливаемых деталей в процессе их нагрева и охлаждения. Диаметр камеры 100 мм, длина – 600 мм.

Принципиальная схема установки показана на рисунке 2.

Закаливаемые детали помещаются в контейнер длиной 120 мм и диаметром 60 мм, ко-

торый так же изготовлен из жаропрочной нержавеющей стали, с коэффициентом заполнения 0,7. Контейнер с деталями размещается в центре нагреваемой вакуумной камеры.

Закалка в вакууме состоит из двух взаимосвязанных процессов. Процесса нагрева закаливаемых изделий в вакууме и процесса охлаждения, который может осуществляться в газовой, жидкой или вакуумной среде.

Преимуществами нагрева в вакууме являются:

- высокая равномерность нагрева излучением, уменьшающая напряжение в поверхностном слое нагреваемых деталей и исключаяющая их коробление;
- сохранение химического состава поверхностных слоёв деталей и, как следствие, возможность их нагрева до высоких температур.

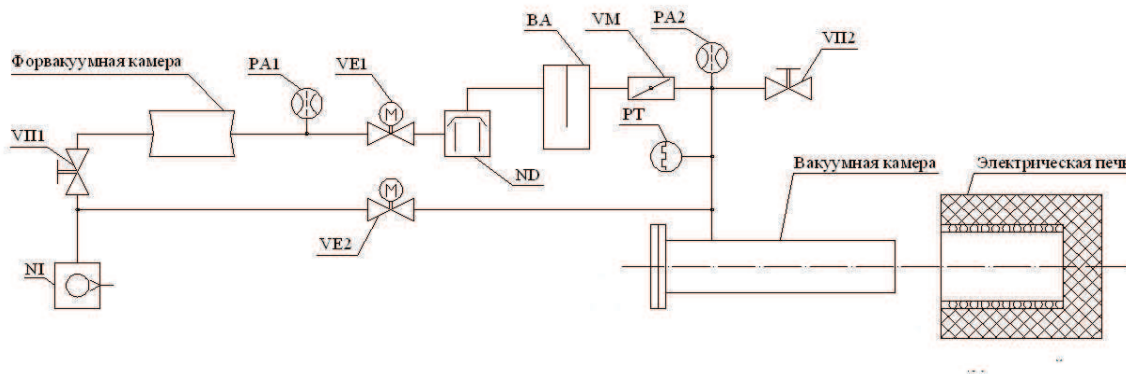


Рисунок 2. Принципиальная схема установки вакуумной закалки: NI – механический насос, ND – диффузионный насос, ВП2 – клапан напуска воздуха, VE2 – байпасный клапан, PT –тепловой манометр, PA – ионизационный манометр

Наиболее сложной и многовариантной является процедура охлаждения закаливаемых деталей. Охлаждение деталей должно осуществляться со скоростью, обеспечивающей формирование мартенситных структур в материале деталей и, следовательно, требуемую их твёрдость. Процесс охлаждения не должен ухудшать качество поверхности и внешний вид изделий, что исключает контакт деталей с охлаждающей средой. Таки образом, необходимо охлаждать всю вакуумную камеру вместе с деталями, но при этом существенно уменьшается скорость охлаждения. Возникает вопрос, возможна ли закалка в этом случае, и если возможна, каковы должны быть режимы охлаждения?

Подбор режимов охлаждения затрудняется большим разнообразием вариантов. Возможно охлаждение нагреваемой вакуумной камеры в жидкости – в воде, или в масле, в воздухе с принудительным обдувом или без него. В самой нагреваемой вакуумной камере в процессе охлаждения может поддерживаться определённая степень разряжения, либо в неё может осуществляться напуск некоторого количества инертного газа с целью повышения скорости охлаждения. Важно и то, что в единичном и мелкосерийном производстве необходимо организовать технологический процесс закалки наиболее простым и дешёвым способом.

Предварительные пробы закалки осуществлялись при нагреве ВК с деталями в диапазоне температур от рекомендованной 1000 – 1150°C, с выдержкой при температуре в течение 30 минут. После чего ВК охлаждалась в воде, и затем осуществлялась нормализация при 200°C в течение 2 часов. Исследования твёрдости образцов показали, что образцы, нагретые до 1150°C, приобрели твёрдость 50-53 HRC. Остальные образцы либо не закалились совсем, либо закалились до твёрдости 20-30 HRC.

Таки образом было установлено, что закалка в вакууме должна быть высокотемпературной. Охлаждение ВК в воде приводит к тому, что сама ВК коробится и быстро выходит из строя, поэтому были исследованы другие способы охлаждения.

Для предварительной оценки различных вариантов и режимов охлаждения была разра-

ботана математическая модель охлаждения деталей в вакууме для проведения компьютерных экспериментов. Для того чтобы сравнить различные варианты охлаждения, была разработана двухтельная модель, в которой одним телом является охлаждаемая садка с набором заготовок, а другим – корпус вакуумной камеры. Упрощённая схема математической модели показана на рисунке 3.

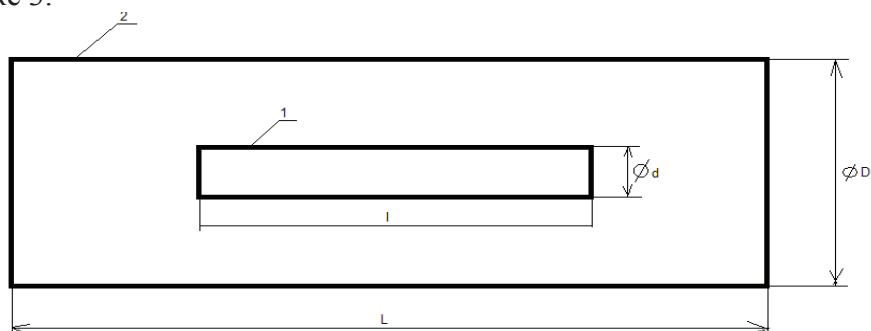


Рисунок 3. Схема математической модели установки: 1 – первое тело садка с закаливаемыми заготовками, 2 – второе тело корпус вакуумной камеры.

Параметры модели соответствуют реальным размерам рабочей камеры: первое тело – цилиндр из жаропрочной нержавеющей стали диаметром $d=60$ мм и длиной $l=120$ мм с коэффициентом заполнения закаливаемыми заготовками $\eta=0,7$; второе тело – закрытый металлический цилиндр длиной $L=600$ мм, диаметром $D=100$ мм, с толщиной стенки $h=5$ мм. Так как разрабатываемая модель предназначена для приближённых оценок влияния различных факторов на скорость охлаждения, примем ориентировочно значения теплофизических параметров для материалов вакуумной камеры садки и закаливаемых заготовок одинаковыми и приблизительно равными следующим значениям плотности – $\rho = 8 \text{ г/см}^3$; теплоёмкости – $C = 0,45 \text{ Дж/г} \cdot \text{K}^0$; теплопроводности – $\lambda = 0,2 \text{ Вт/см} \cdot \text{K}^0$.

При моделировании были сделаны следующие допущения:

- теплопроводность тел многократно выше теплопроводности сред, поэтому градиенты температуры внутри тел не рассматриваются;
- так как поверхности тел существенно различаются, передача энергии осуществляется только за счёт излучения центрального тела [6], и приведённый коэффициент черноты равен коэффициенту черноты центрального тела;
- теплообмен со средой осуществляется по закону Ньютона, причём коэффициенты теплообмена определяются эмпирически.

Обозначим: T_1 – температура первого тела, T_2 – температура второго тела, T_0 – температура окружающей вакуумную камеру среды. Температура первого тела T_1 изменяется под действием потока тепла, создаваемого разностью температур $T_1 - T_2$. Температура второго тела (ВК) – T_2 изменяется под влиянием двух потоков, приходящего от первого тела и уходящего от ВК в окружающую среду. В модели учитываются две составляющие потоков: лучистая и конвективная. Динамика изменения температуры тел при охлаждении описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{T}_1 = -(\alpha_{и1}(T_1, T_2) + \alpha_{к1})(T_1 - T_2) \\ \dot{T}_2 = -(\alpha_{и2}(T_1, T_0) + \alpha_{к2})(T_2 - T_0) + (\alpha_{и1}(T_1, T_2) + \alpha_{к1})(T_1 - T_2) \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1):

$$\alpha_{и1}(T_1, T_2) = \frac{S_1 \varepsilon C_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)}{C \rho V_1 (T_1 - T_2)} \quad (1a)$$

- приведённый коэффициент лучистого теплообмена в форме Ньютона тел 1 и 2;

$$\alpha_{и2}(T_2, T_0) = \frac{S_2 \varepsilon C_0 \left(\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right)}{C \rho V_2 (T_2 - T_0)} \quad (16)$$

- приведённый коэффициент лучистого теплообмена в форме Ньютона тела 2 и окружающей среды;

$\alpha_{к1}, \alpha_{к2}$ – приведённые эмпирические коэффициенты конвективного теплообмена для вакуумной камеры и окружающей её атмосферы;

$S_1, V_1; S_2, V_2$ – площади поверхностей и объёмы 1 и 2 тел соответственно;

C, ρ, ε – теплоёмкость, плотность, коэффициент черноты тел 1 и 2;

C_0 – постоянная Стефана-Больцмана.

Система (1) не линейна, и решения могут быть получены только численными методами. Система (1) позволяет оценить влияние лучистого и конвективного теплообмена на скорости изменения температуры тел 1 и 2 и время их охлаждения.

Решения системы (1) получены с помощью системы MATLAB. В первом случае варьировался коэффициент $\alpha_{к2}$ при фиксированном значении $\alpha_{к1}$, соответствующему давлению в вакуумной камере 10^{-3} Па. Оценка значения $\alpha_{к1}$ проводилась по методике [6] и проверялась опытным путём по времени охлаждения тела 1. Для вакуума и заданных параметров тел $\alpha_{к1} = 1 \cdot 10^{-5} [1/C]$. Параметр $\alpha_{к2}$ отражает различные варианты охлаждения вакуумной камеры. Моделировались три случая:

- охлаждение в воде $\alpha_{к2} = 10 [1/C]$;
- охлаждение на воздухе с обдувом $\alpha_{к2} = 5 \cdot 10^{-1} [1/C]$;
- охлаждение на воздухе без обдува $\alpha_{к2} = 1 \cdot 10^{-1} [1/C]$.

Результаты моделирования приведены на рисунке 4. Как видно из приведённых графиков, температура садки с деталями уменьшается до 500°C примерно за 10 минут, что хорошо согласуется с экспериментом. Время и характер охлаждения садки в высоком вакууме практически не зависит от способа охлаждения вакуумной камеры.

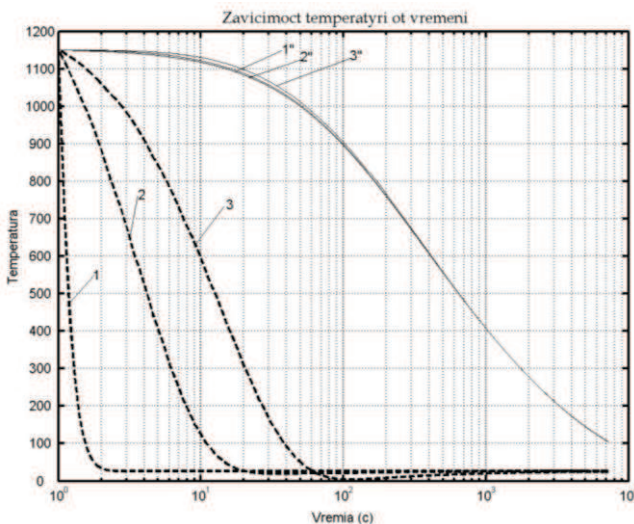


Рисунок 4

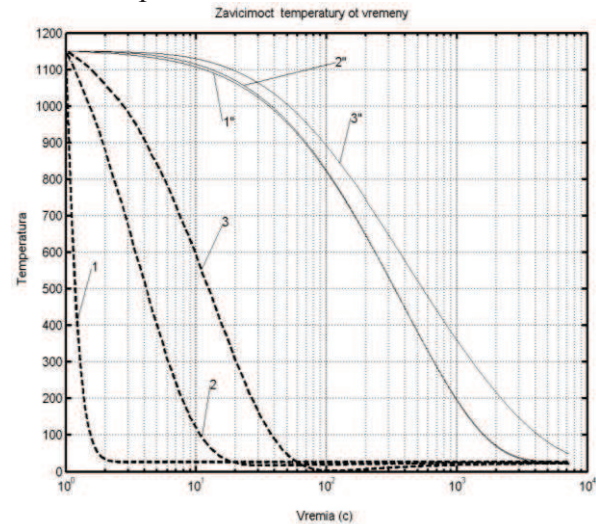


Рисунок 5

Зависимость температуры от времени: 1,2,3 – зависимости температуры ВК; 1'',2'',3'' – соответствующие зависимости температуры садки; 1 – охлаждение ВК в воде, 2 – охлаждение на воздухе с обдувом, 3 – охлаждение на воздухе без обдува

В другом численном эксперименте оценивалось влияние методов охлаждения вакуумной камеры на скорость охлаждения садки при среднем вакууме. В этом случае значения $\alpha_{к2}$ оставались прежними, а $\alpha_{к1} = 5 \cdot 10^{-3} [1/C]$, что по нашим оценкам соответствует среднему вакууму, который создавался напуском в камеру аргона до давления $(5-7)10^2$ Па. Результаты приведены на рисунке 5.

Как следует из рисунка, влияние способа охлаждения ВК на скорость охлаждения садки возросло, причём охлаждение в воде и на воздухе с обдувом мало отличаются друг от друга. Температура в 500°C достигается за 5-7 минут, а скорость охлаждения при свободной конвекции оказалась практически такой же, как и в предыдущем эксперименте.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимальным режимом охлаждения является охлаждение на воздухе с принудительным обдувом при незначительном напуске аргона в вакуумную камеру. Следует отметить, что при последующем медленном охлаждении камеры и садки в течение 1-2 часов автоматически происходит отпуск деталей.

Эксперименты на реальных образцах показали, что в случаях высокого и среднего вакуума достигается твёрдость 50-55 HRC при охлаждении с обдувом. Следовательно, можно предположить, что закалка происходит при повышенных температурах, где скорость охлаждения составляет $70-100^{\circ}\text{C}$ в минуту. Предварительные металлографические и рентгеноструктурные исследования образцов не позволяют однозначно судить об образовании достаточного объёма мартенситных структур. Можно предположить, что упрочнение заготовок связано, во-первых, со смещением С-кривой закалки в область большей продолжительности садки и, следовательно, со снижением критической скорости закалки [7], и, во-вторых, с образованием большого количества хромистых карбидов при повышенных температурах закалки [2].

Выводы

1. Высокотемпературная закалка в вакууме стали 40X13 с охлаждением ВК на открытом воздухе позволяет достичь твёрдости 50-55 HRC без изменения цвета деталей и ухудшения качества их поверхности.
2. Процессы закалки и отпуска в случае высокотемпературной вакуумной закалки могут быть совмещены в одном цикле нагрева.
3. Разработанная двухтельная математическая модель процесса охлаждения вакуумной камеры и садки с закаливаемыми деталями адекватно отражает реальные процессы закалки и может быть использована для предварительной апробации режимов охлаждения и вариантов конструкции вакуумной камеры.

Литература

1. Научные технологии машиностроительного производства: Физико-химические методы и технологии. Учебное пособие / Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин, С.Б. Саушкин. Под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Издательство «Форум», 2013. – 928 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение, 6-е изд. М.: «Металлургия», 1986. С. 370-378.
3. Мармер Э.Н., Мурованная С.Г., Васильев Ю.Э. Электропечи для термовакuumных процессов. 2-е изд., переработанное и дополненное. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Мурованная С.Г. Закалка сталей в вакууме. М.: «Машиностроение», 1974, 22 с.
5. Баранов И.В. Оборудование для термической обработки в вакууме. М.: «Машиностроение», 1975, 33 с.
6. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. Издание второе М., «Высшая школа», 1975. С. 428-431.
7. Физическое металловедение. В 3-х томах / Под редакцией Р.У. Кана и П. Хаазена, М.: «Металлургия», 1987, т. 2. С. 508-511.
8. Physical metallurgy R.W. Cahn, P. Haasen, vol. 2, North-Holland Physics Publishing, Amsterdam- Oxford-New York- Tokyo.