

# Исследование закалочного охлаждения в газовых средах

С. Ю. ШЕВЧЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. Е. СМИРНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, И. В. КИРИЛЛОВ<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, Н. А. КУРПЯКОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия (zakalka1@yandex.ru)

<sup>2</sup> ФГУП ВИАМ, г. Москва, Россия

*С помощью призматических датчиков двух типоразмеров определены коэффициенты теплоотдачи азота высокого давления при различных скоростях вращения ротора турбины вакуумной печи 10.0VPT-4020/24N компании SECO/WARWICK, а также проведена оценка адекватности полученных значений.*

**Ключевые слова:** газовая закалочная среда; датчик Будрина; коэффициент теплоотдачи; охлаждающая способность; моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Закалка в газах высокого давления применяется для деталей сложной формы, изготавливаемых из сталей мартенситного класса, а также ряда сплавов, упрочняемых термической обработкой. В литературе [1, 2] практически отсутствуют справочные данные об охлаждающей способности газовых закалочных сред (ЗС). Их охлаждающая способность может быть описана значением и характером изменения коэффициента теплоотдачи в процессе закалки. Температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи используют в тепловых расчетах для моделирования закалочного охлаждения деталей и прогнозирования результатов закалки без проведения экспериментов. В связи с этим определение охлаждающей способности газовых ЗС является весьма актуальной задачей.

Известны методы определения коэффициента теплоотдачи [3, 4] путем измерения температуры непосредственно на поверхности датчика и вблизи нее. Разность этих температур пропорциональна тепловому потоку от поверхности датчика в процессе охлаждения и коэффициенту теплоотдачи. Техническая задача размещения термодпары на поверхности конструктивно сложна, поэтому известные устройства довольно дороги и недолговечны.

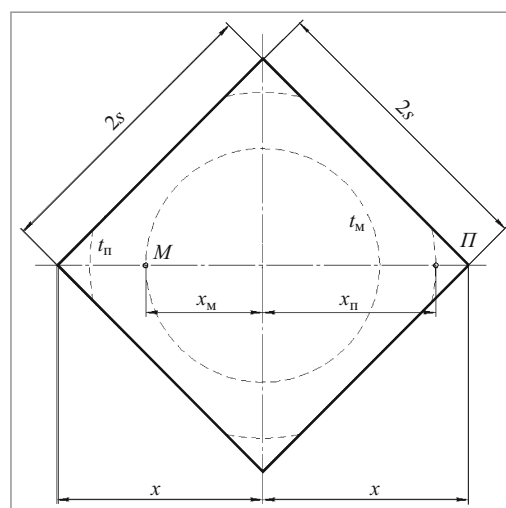
В работе известного теплотехника Д. В. Будрина [5] представлен метод определения охлаждающей способности ЗС с помощью призматического датчика. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в процессе закалочного охлаждения может быть рассчитан по формуле:

$$\alpha = \frac{m \cdot c \cdot (t_{m2} - t_{m1})}{F \cdot \left( \frac{t_{n1} + t_{n2}}{2} - t_{\text{окр}} \right) \cdot \Delta\tau},$$

где  $m$  — масса датчика, кг;  $t_{m1}$  и  $t_{m2}$  — средняя температура по массе датчика в начале и в конце расчетного интервала, °С;  $c$  — средняя теплоемкость мате-

риала датчика в интервале температур  $t_{m1} - t_{m2}$ , Дж/(кг · °С);  $F$  — площадь поверхности датчика, м<sup>2</sup>;  $t_{n1}$  и  $t_{n2}$  — средняя температура поверхности датчика в начале и в конце расчетного интервала, °С;  $t_{\text{окр}}$  — температура окружающей (закалочной) среды, °С;  $\Delta\tau$  — длительность расчетного интервала, с.

В работе [5] установлено, что при охлаждении квадратной призмы, куба и короткого цилиндра изотермы со средней по поверхности ( $t_n$ ) и средней по массе ( $t_m$ ) температурами располагаются внутри образца. Положение их в поперечном сечении длинной квадратной призмы показано на рис. 1. Координаты точек  $\Pi$  и  $M$  расположены в месте пересечения рассматриваемых изотерм с диагональю призмы, и положение этих точек изменяется только на ранней стадии охлаждения. Для основного периода охлаждения положение точек  $\Pi$  и  $M$  стабилизируется, а их относительные координаты составляют  $X_{\Pi}/x = 0,84$  и  $X_M/x = 0,57$ . Преимуществом представленного мето-



**Рис. 1.** Схема квадратной призмы с изотермами в поперечном сечении: средней по поверхности  $t_n$  и средней по массе  $t_m$

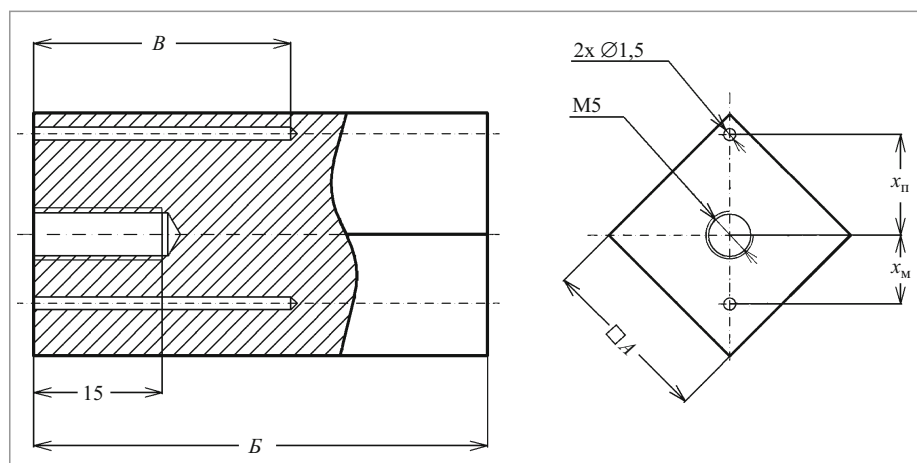


Рис. 2. Эскиз корпуса датчика

да является то, что для измерения температуры поверхности датчика нет необходимости размещать термопару на самой поверхности.

Датчик, изготовленный Д. В. Будриным, имел длину 200 мм и сторону призмы  $2s = 40$  мм. По оси призмы и на расстоянии  $0,84x$  и  $0,57x$  от нее по диагонали ( $x$  — длина полудиагонали призмы) в точках  $П$  и  $М$  были размещены термопары. В работе [6] было обосновано уменьшение размеров датчика и опробован датчик длиной 72 мм и стороной призмы 30 мм. С его помощью были определены коэффициенты теплоотдачи различных жидких закалочных сред — воды, масла, водных растворов полимеров.

Цель настоящей работы — получение температурных зависимостей коэффициентов теплоотдачи азота при различных его давлениях.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследованиях использовали датчики Будрина со сторонами призмы 20 и 30 мм, изготовленные из стали 12Х18Н10Т. Эскиз корпуса датчика показан на рис. 2. В отверстиях диаметром 1,5 мм размещали

Таблица 1. Размеры корпусов датчиков

Датчик со стороны призмы	Размер, мм				
	$A$	$B$	$B$	$X_M$	$X_P$
20 мм	20	60	30	8,05	11,75
30 мм	30	72	36	12,08	17,63

Таблица 2. Режимы закалки образцов и деталей

Марка стали	Размеры образцов и детали, мм	Температура закалки, °С	Давление охлаждающего газа (скорость вращения ротора турбины)
03Н18К9М5Т	$\varnothing 40 \times 16$	980	0,2 МПа (медленно и быстро)
20Х2Н4А	$\varnothing 52 \times 64$	860	0,4 и 0,73 МПа (медленно и быстро)
12ХН3А	$\varnothing 46 \times 14$	860	
16ХЗНВФМБ-Ш (ВКС-5)	Шестерня топливного насоса $\varnothing 70 \times 76; m = 6 \text{ мм}; z = 12$	910	

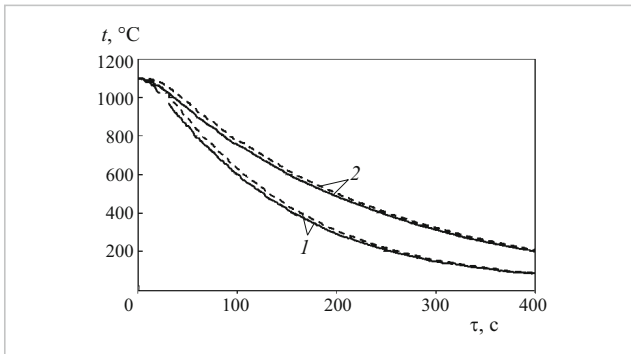
кабельные термопары типа ТНН(Н); их рабочие спай располагали посередине высоты призматического корпуса. Размеры корпусов приведены в табл. 1.

Закалку проводили в вакуумной печи 10.0VPT-4020/24N — это однокамерная печь с горизонтальной загрузкой материала и возможностью охлаждения в инертном газе (азоте) при давлении до 0,73 МПа. Эффективная циркуляция охлаждающего газа в рабочем пространстве печи обеспечивается с помощью турбины, что способствует быстрому и равномерному охлаждению садки. Турбина имеет два режима работы: 50 и 100 % мощности, подаваемой на электродвигатель, что соответствуют медленному и быстрому вращению ротора турбины.

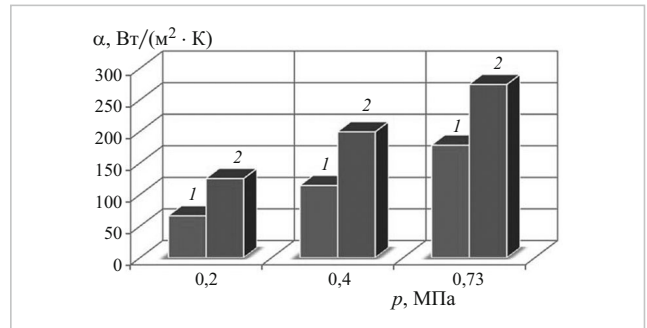
Закалочное охлаждение датчиков проводили в атмосфере азота высокого давления — 0,2; 0,4 и 0,73 МПа — с быстрым и медленным вращением ротора турбины. Регистрацию кривых охлаждения проводили с помощью компьютера, к которому подключали термопары через аналого-цифровой преобразователь [7].

Для проверки адекватности расчетов коэффициентов теплоотдачи использовали образцы и деталь из различных сталей (табл. 2).

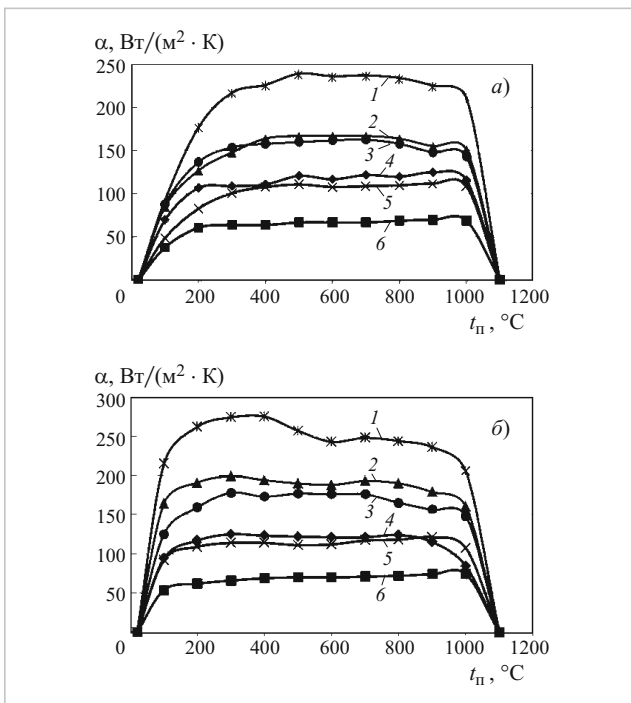
В программном комплексе Autodesk Inventor создавали модели образцов и детали. Расчет тепловых полей проводили в программе ANSYS Workbench 10.0 и 12.1. В качестве граничных условий задавали температурные зависимости коэффициентов тепло-



**Рис. 3.** Кривые охлаждения термопар датчика со стороной 30 мм, измеряющих температуру поверхности  $t_{п}$  (1) и температуру массы  $t_{м}$  (2) при давлении азота 0,4 МПа, медленном (штриховые линии) и быстром (сплошные линии) вращении ротора турбины



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента теплоотдачи азота при температуре 300 °С от давления газа при медленном (1) и быстром (2) вращении ротора турбины



**Рис. 4.** Коэффициенты теплоотдачи азота, рассчитанные по кривым охлаждения датчиков со стороной 20 (а) и 30 мм (б) для различных давлений азота, быстрого и медленного вращения ротора турбины:

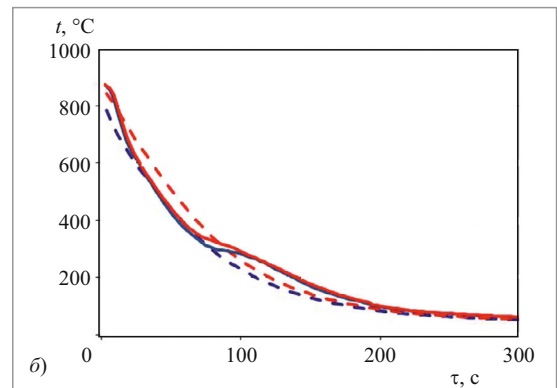
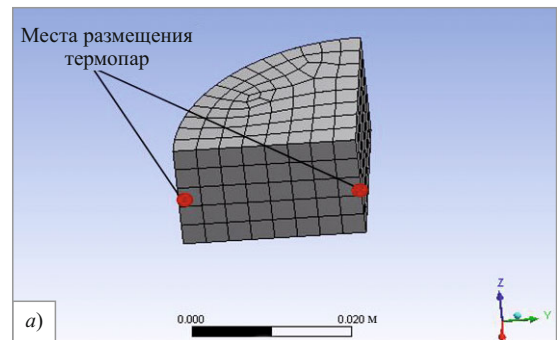
1 —  $p = 0,73$  МПа (быстро); 2 —  $p = 0,4$  МПа (быстро); 3 —  $p = 0,73$  МПа (медленно); 4 —  $p = 0,2$  МПа (быстро); 5 —  $p = 0,4$  МПа (медленно); 6 —  $p = 0,2$  МПа (медленно)

отдачи азота при различных давлениях и двух режимах вращения ротора турбины<sup>1</sup>.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера на рис. 3 приведены кривые охлаждения термопар датчика со стороной 30 мм в азоте при давлении 0,4 МПа.

<sup>1</sup> В работе принимали участие магистранты МГТУ им. Н. Э. Баумана М. Г. Шмидт и Вай Ян Мин Хтет.

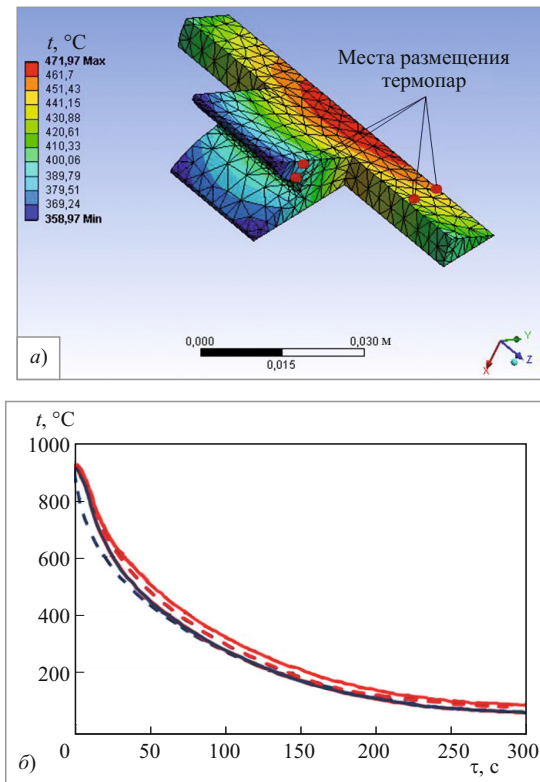


**Рис. 6.** Моделирование закалочного охлаждения образца из стали 12ХН3А:

а — модель с указанием точек размещения термопар; б — расчетные (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные линии) кривые охлаждения в центре (красные линии) и на поверхности (синие линии) образца

Температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи, рассчитанные по кривым охлаждения датчиков со сторонами 20 и 30 мм (рис. 4) для одинаковых режимов охлаждения, показывают сопоставимые результаты.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента теплоотдачи азота при температуре 300 °С от давления газа для двух скоростей вращения ротора турбины. Видно, что охлаждающая способность азота растет с увеличением давления и интенсивности циркуляции газа в вакуумной камере.



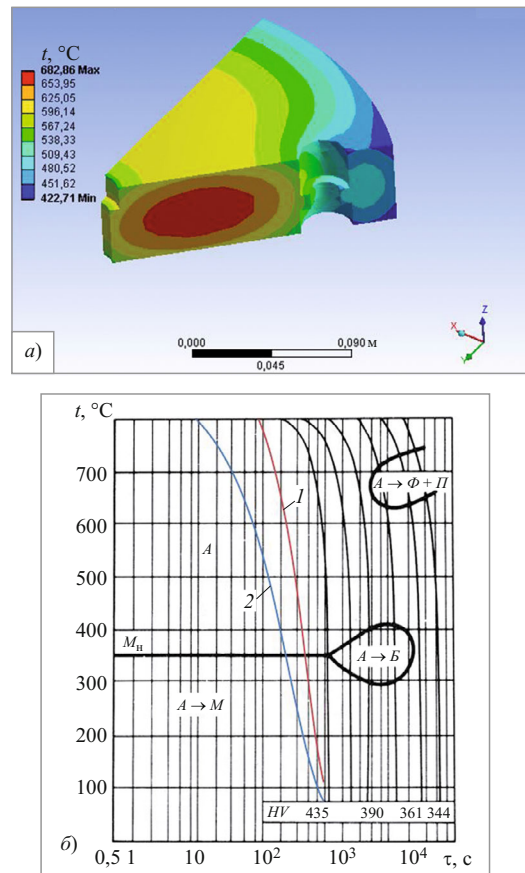
**Рис. 7.** Моделирование закалочного охлаждения шестерни из стали ВКС-5:

*a* — тепловые поля в модели; *б* — расчетные (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные линии) кривые охлаждения в центре (красные линии) и на поверхности (синие линии) ступицы

Моделирование закалочного охлаждения образца из стали 12ХН3А (рис. 6, *a*) с использованием экспериментально определенных коэффициентов теплоотдачи азота дало возможность рассчитать кривые охлаждения различных точек образца. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных при охлаждении в азоте при давлении 0,73 МПа и быстром вращении ротора турбины показано на рис. 6, *б*. Различия экспериментальных и расчетных кривых незначительно и связано с тем, что при моделировании не учитывали выделение тепла при мартенситном превращении.

На рис. 7, *a* представлены тепловые поля в шестерне из стали ВКС-5 (16Х3НВФМБ-Ш), охлаждаемой потоком газа с давлением 0,4 МПа при быстром вращении ротора турбины в момент времени 140 с. На модели показаны места размещения термопар. Экспериментальные и расчетные кривые охлаждения точек, расположенных в центре шестерни и вблизи поверхности ступицы, приведены на рис. 7, *б*. Экспериментальные и расчетные кривые практически совпадают; незначительное отличие вызвано неполными данными о теплофизических свойствах стали ВКС-5.

Таким образом, для вакуумной печи 10.0VPT-4020/24N получены температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи азота высокого



**Рис. 8.** Моделирование закалочного охлаждения плиты из стали 25Х5МФ:

*a* — тепловые поля в модели; *б* — расчетные кривые охлаждения в сердцевине (1) и на поверхности (2) детали, наложенные на термокинетическую диаграмму стали

давления при различных режимах закалочного охлаждения (давлении и условиях конвекции). Эти зависимости могут быть использованы для прогнозирования результатов закалки различных изделий в данной печи.

На рис. 8 приведен пример такого прогнозирования. Моделировали закалочное охлаждение плиты диаметром 350 и толщиной 55 мм из стали 25Х5МФ в азоте при давлении 0,73 МПа и быстром вращении ротора турбины. На рис 8, *a* представлены тепловые поля в модели в момент времени 199 с, а на рис. 8, *б* — кривые охлаждения центра и поверхности модели, наложенные на термокинетическую диаграмму стали 25Х5МФ [8]. Проведенный расчет позволяет сделать вывод, что данное изделие может быть закалено в вакуумной печи 10.0VPT-4020/24N при указанном режиме охлаждения.

Аналогичные экспериментальные работы могут быть проведены для всего модельного ряда оборудования компании SECO/WARWICK, а также вакуумных печей различных производителей.

Экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи газовой закалочной среды даст возможность достоверно прогнозировать результаты закал-

ки конкретных изделий в потоке газа высокого давления в различных вакуумных печах.

### ВЫВОДЫ

1. При помощи датчиков Будрина получены температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи азота высокого давления для различных режимов закалочного охлаждения в вакуумной печи 10.0VPT-4020/24N.

2. Размер датчика практически не влияет на значение коэффициентов теплоотдачи газовой закалочной среды. Максимальные значения коэффициента теплоотдачи, определенные с помощью двух датчиков, отличаются не более чем на 20 %.

3. Полученные результаты проверены методом математического моделирования закалки образцов и деталей из различных сталей. Экспериментальные и расчетные кривые охлаждения термопар образцов близки, что дает возможность судить об адекватности полученных данных по охлаждающей способности азота высокого давления.

4. Математическое моделирование и достоверное прогнозирование результатов, основанное на экспериментально определенных коэффициентах теплоотдачи азота высокого давления, дадут возможность

сократить затраты при обработке технологии закалки конкретных изделий в потоке газа высокого давления в вакуумных печах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Люты В.* Закалочные среды: Справ. изд. Под ред. С. Б. Масленкова / Пер. с польск. Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1990. 192 с.
2. *Карпов Л. П.* Закалка в потоке сжатых газов // *МиТОМ*. 1966. № 7. С. 59 – 62.
3. *Liscic B.* Moglichkeitender Berechnung, Messungund Steuerungdes Temperaturverlaufesbeim Abschrecken // *Neue Hutte*. 1983. Bd. 11. S. 405 – 411.
4. *Пат. 2008635 РФ.* Датчик теплового потока / А. Е. Александров, А. Г. Галянов, Б. А. Прусаков и др. // *Б.И.* 1994. № 4.
5. *Будрин Д. В., Суханов Е. Л., Кондратов В. М.* Применение термозонда призматической формы для определения охлаждающей способности закалочных сред // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1966. № 2. С. 134 – 139.
6. *Шевченко С. Ю.* Определение коэффициентов теплоотдачи закалочных сред с использованием призматического датчика // *Технология металлов*. 2009. № 5. С. 39 – 42.
7. *Ксенофонтов А. Г., Прусаков Б. А., Шевченко С. Ю.* Разработка портативной установки для определения охлаждающей способности закалочных сред // *МиТОМ*. 2001. № 1. С. 39 – 40.
8. *Попова Л. Е., Попов А. А.* Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. М.: Металлургия, 1991. 503 с.

## ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

УДК 669.14.018.258:621.785.533

# Повышение эксплуатационных свойств штамповой стали 5Х2ГФ путем создания карбонитридных слоев химико-термической обработкой

Н. А. КОСТИН, канд. техн. наук

Курский государственный университет, г. Курск, Россия (nikolay-kostin@yandex.ru)

*Исследовано влияние нитроцементации в высокоактивной среде на основе аморфного углерода и железосинеродистого калия на структуру и свойства штамповой безникелевой стали 5Х2ГФ. Температура нитроцементации изменялись в интервале 800 – 900 °С, длительность — от 3 до 8 ч. Определены структура и твердость стали, показано значительное повышение (в 4 – 6 раз) ее износостойкости после нитроцементации.*

**Ключевые слова:** штамповая сталь; нитроцементация; износостойкость.

### ВВЕДЕНИЕ

Обработка металлов давлением является одним из высокопроизводительных и экономичных процессов изготовления деталей в машиностроении. Увеличение объема машиностроительного производства,

намечающееся в последнее время для проведения импортозамещения, предполагает значительное расширение штамповки и совершенствование ее методов. Однако при разработке современных высокопроизводительных процессов штамповки возникают