

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.762.034:669.1

**В. В. АКИМОВ
М. В. АКИМОВ
М. В. ПЛАСТИНИНА**

Сибирская государственная
автомобильно-дорожная академия,
г. Омск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛАМЕ, ГИДРОСТАТИЧНОСТИ, ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ TiC-TiNi В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА КОМПОЗИЦИИ

Используя значения упругих характеристик и скорости распространения ультразвуковых волн в твердом сплаве TiC-TiNi определены коэффициенты Ламе (Λ -лямбда, μ -мю), а также коэффициент гидростатичности χ . Установлена оценка теплостойкости данного сплава в сравнении с твердыми сплавами BK6, BK8.

Ключевые слова: твердые сплавы, упругие модули, коэффициенты Ламе, гидростатичность, теплостойкость, композиция.

Порошковые твердые сплавы на основе карбидов титана со связующими металлами из Ni-Mo-Fe-Co-Al могут применяться в качестве инструментальных материалов, заменяющих стандартные твердые сплавы [1]. Поэтому в материаловедении возникает

необходимость получения более полных данных об упругих, пластических свойствах и теплостойкости таких сплавов.

В работах [2, 3] нами были проведены экспериментальные исследования по определению упру-

гих и пластических свойств твердых сплавов TiC-TiNi от состава композиции и влиянию пористости на упругие характеристики (модуль Юнга E, модуль сдвига G и объемной деформации K, коэффициент Пуассона ν и пластичности твердого сплава $q = \frac{K}{G}$ [2].

Однако в работах [2, 3] не были определены для данного твердого сплава следующие характеристики (коэффициенты Ламе (Λ , μ), коэффициент гидростатичности χ и не дана оценка теплостойкости.

Образцы для исследования готовили стандартными методами порошковой металлургии из карбида титана TiC и никелида титана TiNi, которые смешивались в электромеханической мешалке в течение суток. В достаточно перемешанную смесь порошков карбида титана и никелида титана разного объемного состава добавляли 6 %-й раствор пластификатора (каучука) в чистом бензине. После повторного перемешивания смесь подвергалась сушке при комнатной температуре, потом просеивалась через сито с размером ячеек 800 мкм. Образцы получали методом холодного прессования под давлением 80–100 МПа в металлической пресс-форме с последующим вакуумным спеканием в лабораторной печи.

Спекание образцов проводили при температуре 1350°C в течении 10–15 мин с последующим быстрым охлаждением вместе с печью [4]. Для исследования на ультразвуковой установке использовали образцы твердого сплава (TiC-TiNi) разного объемного состава с параллельными гранями (отклонение не превышало 10^{-3} рад) с разной пористостью после спекания. Шероховатость поверхности образцов $\sqrt{Ra} 1,25...0,63$. Образцы измерялись ультразвуковым методом на аналогичной установке, описанной в работе [2].

Упругие характеристики твердых сплавов определялись на образцах из карбида титана с различным количеством связующей фазы TiNi. По результатам экспериментальных исследований установлено, что коэффициенты Пуассона ν для данных сплавов различаются незначительно (0,248–0,320) (табл. 1).

Как видно из табл. 1 на характер концентрационных зависимостей модуля объемной упругости (K) значительное влияние оказывают значения модуля упругости (E) и предел текучести связующей фазы. Уменьшения результатов модуля объемной упругости очевидно связано с увеличением содержания металлической связующей фазы TiNi в твердом сплаве.

Физико-механические характеристики твердых сплавов на основе TiC.

Коэффициент гидростатичности в первом приближении рассчитывался для данных композиций, без учета влияния пористости, равным $\chi = \frac{1+\nu}{3(1-\nu)}$, где ν — коэффициент Пуассона [5]. Из результатов исследований следует, что с увеличением связующей фазы TiNi, коэффициент гидростатичности возрастает, а это приводит к росту уплотнения порошков TiC и TiNi.

В математической линейной теории упругости упругие коэффициенты Ламе (Λ , μ) зависят только от упругих постоянных модулей Юнга (E) и материала, поэтому параметры Ламе выражают так [6]:

$$\Lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \text{ (Ламбда)}, \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (1)$$

здесь E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона, G — модуль сдвига.

Коэффициенты Λ , μ , как и модули упругости E, G, — характеризуют упругие свойства материала. Кроме того, в линейной теории упругости закон Гука выражает линейную зависимость между тензором деформации ϵ и тензором напряжений σ в упругой среде

$$\sigma = 2\mu\epsilon + \lambda T_r(\epsilon)I, \quad (2)$$

где Λ называется первым параметром Ламе, а μ — вторым параметром Ламе.

Вклад упругих деформаций в свободную энергию является линейной комбинацией двух скаляров с коэффициентами, которые называют параметрами Ламе [6].

$$F = \frac{\lambda}{2} \left(\sum_i \epsilon_{ii} \right)^2 + \mu \sum_{i,k} \epsilon_{i,k}^2. \quad (3)$$

Если решения задачи теории упругости проводятся в перемещениях, то обычно используют уравнение Ламе с коэффициентами, что важно при анализе волнового уравнения [7, 8]. Эти коэффициенты удобно использовать, как константы. К сожалению, в справочниках их редко указывают, поэтому результаты их представлены в табл. 1. Для упругого коэффициента μ наблюдается тенденция уменьшения значений при снижении карбидной составляющей TiC в твердом сплаве. Коэффициент Λ (ламбда) изменяется немонотонно, вначале наблюдается его незначительный рост, потом заметно небольшое снижение, с последующим увеличением.

Интересные результаты были получены по оценке теплостойкости твердого сплава состава (50 % TiC — 50 % TiNi) об % и сплавов на основе карбида

Таблица 1

Изменение упругих модулей, коэффициентов Ламе, гидростатичности в зависимости от состава композиций твердых безвольфрамовых сплавов

Состав твердого сплава, об %	E, Г Па	K, Г Па	ν , коэф-т Пуассона	χ , коэф-т гидростатичности	Λ , коэф-т Ламе, ламбда, ГПа	μ коэф-т Ламе, мю, ГПа
70 % TiC — 30 % TiNi	350,8	232	0,248	0,553	138,08	140,54
60 % TiC — 40 % TiNi	314,3	221	0,263	0,571	138,22	124,43
50 % TiC — 50 % TiNi	286,2	212	0,275	0,585	137,11	112,23
40 % TiC — 60 % TiNi	250,9	205	0,296	0,614	140,40	96,79
30 % TiC — 70 % TiNi	216	200	0,320	0,647	145,5	81,82

Изменение массы твердого безвольфрамового сплава при нагревании до 820° С

Изменение массы сплавов при нагреве до 820°С, 10 ⁻³ кг.	Сплав (50 % TiC — 50 % TiNi), об %	Сплав ВК6	Сплав ВК8
		0,04	2,60

вольфрама ВК6, ВК8 при нагреве до температуры 820°С. Исследуемые образцы выдерживались в печи СНО-2.55. 1,7/12 при заданной температуре 4 часа, а затем охлаждались вместе с печью до комнатной температуры. Твердый сплав (50 % TiC — 50 % TiNi) об % полностью сохранил свою исходную твердость 86HRA.

Изменения массы твердых сплавов при нагревании с 4-часовой выдержкой. Небольшой прирост массы образца в процессе нагрева примерно на $0,04 \cdot 10^{-3}$ кг позволяет констатировать незначительное окисление сплава 50 % TiC — 50 % TiNi. Твердые вольфрамосодержащие сплавы ВК6, ВК8 сильно окислились и разбухли, прирост массы образцов для них составил $(2,5 \div 2,6) \cdot 10^{-3}$ кг (табл. 2), твердость у них значительно снизилась. Образовавшиеся окислы у вольфрамосодержавших твердых сплавов имели фиолетовый цвет, что позволяет констатировать об окислении кобальтовой связующей фазы. Это в результате привело к разупрочнению твердых сплавов ВК6, ВК8. В сплавах же на основе карбида титана со связующей фазой TiNi твердость сохранилась неизменной, разупрочнения материала не произошло.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о высокой теплостойкости твердых сплавов на основе TiC при достаточно высоких температурах (700–850)°С, с достаточно высокими упругими характеристиками, которые приведены в табл. 2. Причем по полученным экспериментальным путем значениям модулей упругости с помощью приведенных зависимостей (1) определены постоянные коэффициенты Ламе.

Библиографический список

1. Андриевский, Р. А. Наноконпозиты на основе тугоплавких соединений: состояние разработок и перспективы / Р. А. Андриевский // Материаловедение. — 2006. — № 4. — С. 20–26.

2. Акимов, В. В. применение ультразвукового резонансного метода для определения упругих и пластических характеристик сплавов TiC-TiNi / В. В. Акимов, Н. А. Иванов // Прикладная механика и техническая физика. — 2002. — Т. 43, № 2. — С. 203–207.

3. Акимов, В. В. Влияние пористости на упругие характеристики твердых сплавов TiC-TiNi / В. В. Акимов, М. В. Акимов, М. С. Корытов, М. В. Пластинина // Прикладная механика и техническая физика. — 2009. — Т. 50, № 4. — С. 136–138.

4. Акимов, В. В. Механизм жидкофазного спекания твердосплавных композитов TiC-TiNi / В. В. Акимов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2006. — № 6. — С. 33–35.

5. Билык, И. И. Перспективы использования карбонитридов в качестве твердой составляющей металлокерамических твердых сплавов / И. И. Билык // Порошковая металлургия. — 1992. — № 6. — С. 49–51.

6. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // Теоретическая физика. В 10 т. Т. 7. — М.: Наука, 1987. — С. 21–258 с.

7. Работнов, Ю. М. Механика деформируемого твердого тела / Ю. М. Работнов. — М.: Наука, 1988. — С. 239–712.

8. Амензаде, Ю. А. Теория упругости / Ю. А. Амензаде. — М.: Высшая школа, 1976. — С. 68–272.

АКИМОВ Валерий Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии»; специалист в области порошковой металлургии и композиционных материалов.

АКИМОВ Марк Валерьевич, руководитель транспортной службы ООО «Сибирские колбасы».

ПЛАСТИНИНА Марина Васильевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики.

Адрес для переписки: splavtini@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2015 г.

© В. В. Акимов, М. В. Акимов, М. В. Пластинина

Книжная полка

621.43/С65

Сорокин, В. Н. Конструкция и рабочие процессы энергетических установок транспортных и технологических машин [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. Н. Сорокин. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

В краткой форме описаны конструкция и принципы работы систем и агрегатов ДВС энергетических установок транспортных и технологических машин и оборудования. Предназначено студентам направления 190600.62 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (нефтегазодобыча)».

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЖАРА, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ВОЗГОРАНИЯ

В статье проведен анализ основных моделей пожара начальной стадии возгорания с учетом комплексного подхода и особенностей объекта. Предлагаемая модель максимально учитывает особенности объекта, что позволяет не только реализовать надежные и эффективные инженерно-техническую и противопожарную системы, но и предотвратить возгорание.

Ключевые слова: математическое моделирование динамики развития пожара, начальная стадия возгорания, дифференциальные уравнения развития пожара, инженерно-технические и противопожарные системы, промышленные объекты.

Использование для оценки пожарного риска [1] математического моделирования динамики развития пожара в настоящее время является актуальной задачей [2–6]. Существующие математические модели можно разделить на следующие основные виды [2, 4, 7]: интегральные, зонные и полевые. Все они основаны на описании изменений во времени при развитии пожара в замкнутом пространстве параметров среднеобъемного состояния окружающей газовой среды [8] (плотность, температура, концентрация кислорода и продуктов горения, оптическая плотность).

Анализ математического описания пожара [4–7] показал, что базовую основу моделей составляют законы сохранения массы и энергии, которые в данном случае [2–4] будут представлять основные уравнения и условия единственности решения задачи:

— уравнение сохранения массы

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi + G_b - G_r + G_{np} - G_{выт} + G_{ов}, \quad (1)$$

— уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned} V \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\rho_m}{k-1} \right) &= (\eta Q_n^p + i_r) \cdot \psi + \\ &+ c_{pв} T_b (G_b + G_{np}) - c_{pк} T_m (G_r + G_{выт}) + \\ &+ c_{pов} T_{ов} G_{ов} - Q_w - Q_r + G_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где V — свободный рассматриваемый объем объекта, м³;

ρ_m — среднеобъемная плотность газовой среды, кг/м³;

ψ — скорость выгорания, характеризующая загазованность окружающей среды, кг/с;

G_b — объем поступающего в помещение через проемы воздуха, кг/с;

G_r — объем истекающих из помещения через проемы газов, кг/с;

G_{np} — объем воздуха, подаваемого приточной вентиляцией, кг/с;

$G_{выт}$ — объем газа, удаляемого системой вытяжной вентиляции, кг/с;

$G_{ов}$ — объем подаваемого огнетушащего вещества, кг/с.

Таким образом, полное математическое описание, представленное системой дифференциальных уравнений развития пожара, дополненное зависимостями газообмена помещения с окружающей средой, теплообмена с ограждающими конструкциями, скоростями газификации и тепловыделения, несмотря на мощности вычислительной техники, получить, как отмечается в [5], на практике весьма сложно.

В [4] предлагается упрощенное решение в первом приближении рассматриваемой системы дифференциальных уравнений пожара, которое получило название интегральной математической модели начальной стадии пожара [1]. Кроме того, аналитическое решение предлагаемой системы дифференциальных уравнений описывает начальную стадию только при свободном развитии пожара без учета взаимодействий инженерно-технических и противопожарных систем [8]. Таким образом, в предлагаемой математической модели система дифференциальных уравнений может быть представлена рядом зависимостей:

— по повышению температуры

$$t_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 + \frac{70 - t_0}{(273 + t_0) \cdot z} \right] \right\}^{1/n}, \quad (3)$$

— по потере видимости

$$t_{кр}^{n.в.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{V \cdot \ln(1,05 \cdot \alpha \cdot E)}{I_{np} \cdot B \cdot D_m \cdot z} \right] \right\}^{1/n}, \quad (4)$$

— по сниженному содержанию кислорода

$$t_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{0,044}{\left(\frac{BL_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \cdot z} \right] \right\}^{1/n}, \quad (5)$$

— по каждому газообразному токсичному продукту горения

$$t_{кр}^{m.г.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L \cdot z} \right] \right\}^{1/n}, \quad (6)$$

где A — параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего материала и площадь пожара, кг/сн;

B — комплексный параметр, зависящий от теплоты сгорания материала и свободного объема помещения, кг;

n — показатель степени, учитывающий изменение массы выгорающего материала во времени;

X — значение предельно допустимого содержания токсичного газа в помещении, кг·м⁻³ ($X_{CO_2} = 0,11$ кг/м³; $X_{CO} = 1,16 \cdot 10^{-3}$ кг/м³; $X_{HCL} = 23 \cdot 10^{-6}$ кг/м³).

Таким образом, переход к простым математическим зависимостям при решении сложной системы дифференциальных уравнений, позволяющим определить время блокирования опасных факторов пожара, были сформулированы обеспечивающие необходимую точность и достоверность результатов допущения [2]:

— после возгорания в помещение не поступает извне свежий воздух, а наблюдается лишь выталкивание газов через проемы под действием избыточного давления, создаваемого пожаром;

— для случая горения разливов горючих жидкостей принимается, что скорость газификации в течение всей начальной стадии развития пожара не изменяется, т.е. остается постоянной;

— отношение суммарного теплового потока в ограждающие конструкции к скорости тепловыделения в очаге горения в течение всего интервала времени, соответствующего критической продолжительности пожара, остается постоянным.

С учетом принятых допущений были предложены зависимости [3, 8–10], позволяющие более точно учитывать потоки воздушных масс, создаваемые общей обменной, а также аварийной и местной системами вентиляции при оценке пожарного риска и описании термогазодинамических процессов пожара.

Основной недостаток интегральных математических моделей пожара заключается в описании изменения среднеобъемных параметров всего объекта в целом [11]. Поэтому была предложена зонная модель [12], при которой помещение делится

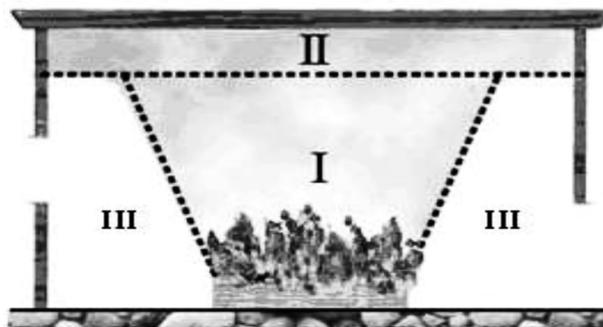


Рис. 1. Схема зонной модели пожара в помещении

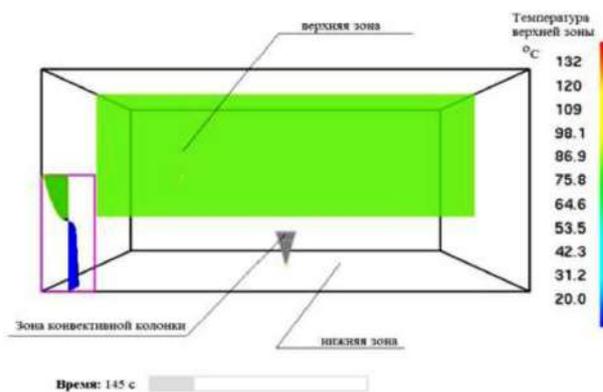


Рис. 2. Визуализация результатов расчета среднеобъемной температуры верхней зоны, полученного с помощью программного комплекса, реализующего зонную математическую модель пожара

на зону конвективной колонки (I), верхнюю (II), нижнюю (III) зоны и (рис. 1), затем создается интегральная математическая модель пожара по каждой зоне. Тогда выполненный для каждой зоны отдельно расчет дает более точный результат, чем для всего объекта (рис. 2). При этом область конвективной колонки характеризуется тем, что основную роль в движении газа выполняют архимедовы силы, которые возникают при различии температур холодных и горячих газов.

Так как зонные модели являются совокупностью интегральных каждой зоны, на которые разделено пространство объекта, то для них принимаются допущения, ранее сформулированные для интегральных математических моделей пожара, что обеспечивает необходимую точность результатов в расчетах [2]:

— скорость газификации горения жидкости принята постоянной величиной, значение которой принимается как для случая установившегося горения;

— не учитывается влияние масс потоков от систем аварийной вентиляции и удаления дыма на геометрическую форму, и термодинамические характеристики газовой среды зоны конвективной колонки;

— отношение суммарного теплового потока в ограждающие конструкции к скорости тепловыделения в очаге горения принята величиной постоянной в течение всего интервала времени, равного критической продолжительности пожара;

— не учитывается влияние функционирования вентиляционных систем, изменения скорости

газификации, изменения отношения теплового потока в ограждения к скорости тепловыделения в очаге горения на интервалах до и после срабатывания систем пожарной сигнализации.

Тогда для формирования полевой модели можно использовать уравнения механики сплошных сред с учетом законов сохранения массы, импульса, энергии и масс компонентов в рассматриваемом малом контрольном объеме:

уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j) = 0, \quad (7)$$

уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j \cdot u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho \cdot g_i, \quad (8)$$

уравнение энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j \cdot h) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (9)$$

где ρ — плотность, кг/м³;

t — время, с;

u — скорость, м/с;

p — динамическое давление, Па;

τ_{ij} — тензор вязких напряжений;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

h — удельная массовая энтальпия смеси, Дж/кг;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

c_p — удельная массовая изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

q_j^R — радиационный поток энергии в направлении x_j .

Предлагаемая система уравнений позволяет описать изменение во времени плотности, температуры

и состава газовой среды в каждой точке пространства объекта (рис. 3). Для получения замкнутой системы уравнений (7–9) используется уравнение состояния идеального газа, которое для смеси газов примет вид:

$$p = \rho R_o T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (10)$$

где R_o — универсальная газовая постоянная Дж/(кг·°К);

T — термодинамическая (абсолютная) температура, °К;

Y_k — массовая концентрация k -го компонента смеси, кг/кг;

M_k — молярная масса k -го компонента.

Таким образом, как следует из проведенного анализа [3, 8–10], основным недостатком полевых математических моделей пожара является, недостаточная изученность явления турбулентности, так как модели К-ε и К-ω имеют ограниченные круг возможности применения. Попытки создания универсальной модели турбулентности [12] не дали желаемых результатов. Кроме этого, недостаточно сведений по изучению процессов выгорания при горении жидкости (процессы газификации), которые оказывают значительное влияние на описание процессов формирования концентрационных и температурных полей, так как изменение скорости газификации горения жидкости существенно зависит от основных свойств, величины рассматриваемого объема объекта и потоков массы газов, создаваемых системами принудительной вентиляции.

Таким образом, проведенный анализ основных допущений, принятых при создании существующих математических моделей пожара [3, 8–10], выявил, что как в интегральных, так и в зонных математических моделях описания пожара не учитывается влияние функционирования вентиляционных систем, изменения скорости газификации, изменения

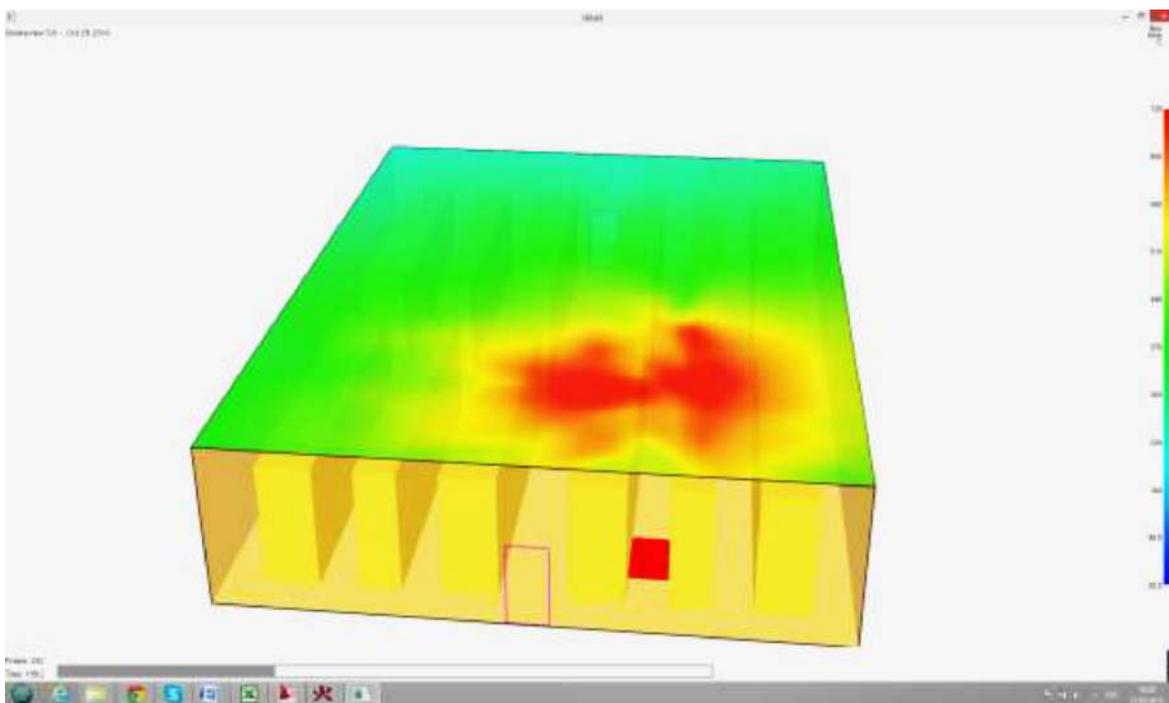


Рис. 3. Распределение полей температуры газовой среды, рассчитанных с помощью полевой математической модели пожара и визуализированных в программном комплексе

отношения теплового потока в ограждения к скорости тепловыделения в очаге горения на интервалах до и после срабатывания систем пожарной сигнализации.

Поэтому для совершенствования существующих математических моделей пожара необходимо получение новых зависимостей для входных параметров при решении задачи с учетом взаимодействия инженерно-технических и противопожарных систем [13]. Для чего необходимо формирование граничных уравнений с учетом турбулентных процессов, присущих пожару на различных объектах.

Библиографический список

1. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. — Введ. 2009-06-30. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. — 71 с.
2. Кошмаров, Ю. А. Развитие пожара в помещении. Горение и проблемы тушения пожаров / Ю. А. Кошмаров // Сб. науч. тр. ВНИИПО МВД СССР. — Вып. 5. — М., 1955. — С. 31–45.
3. Однолько, А. А. Определение величины пожарного риска в производственном помещении с выделением горючих жидкостей и газов / А. А. Однолько, И. В. Ситников // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. — 2011. — № 3 (23). — С. 125–133.
4. Кошмаров, Ю. А. Процессы нарастания опасных факторов пожара в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара / Ю. А. Кошмаров, В. В. Рубцов. — М.: МИПБ МВД России, 1999. — 89 с.
5. Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н. Н. Брушлинского и А. Я. Корольченко. — М.: Пожнаука, 2000. — 482 с.
6. Однолько, А. А. Проблемы применения математических моделей, определяющих время блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара при расчете пожарного риска / А. А. Однолько, И. В. Ситников // Инженерные системы и сооружения. — Воронеж : ВГАСУ. — 2010. — № 1 (2). — С. 185–191.
7. Волянин, Е. Влияние конвективной колонки на распределение давления и на положение плоскости равных давлений / Е. Волянин // Противопожарная техника и безопасность. — М.: ВИПТШ, 1981. — С. 40–46.
8. Колодяжный, С. А. Зависимость качества воздуха помещений от концентрации взрывоопасных веществ на открытых производственных площадях / С. А. Колодяжный, Н. А. Старцева // Каучук и резина. — 2002. — № 2. — С. 33.
9. Колодяжный, С. А. Влияние кратности воздухообмена на распределение вредных веществ / С. А. Колодяжный, И. И. Полосин, Н. А. Старцева // Каучук и резина. — 2008. — № 2. — С. 36.
10. Startseva, N. A. Fire safety in designing pump stations and compressor houses / N. A. Startseva, S. A. Kolodyazhny // Scientific herald of Voronezh state university of architecture and civil engineering. Construction. Architecture. Transport. — 2008, № 2. — pp. 155.
11. Ахтулов, А. Л. Особенности построения при автоматизации проектирования систем пожаротушения на распределенных объектах / А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, А. Е. Любаков, Л. А. Иванова // Омский научный вестник. Сер. Общество. История. Современность. — 2013. — № 3 (119). — С. 58–62.
12. Пузач, С. В. Математическое моделирование газодинамики и теплообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности / С. В. Пузач. — М.: Аккад. ГПС МЧС России, 2002. — 150 с.
13. Ахтулов, А. Л. Разработка методики и средств организации технологической подготовки производства пожарно-технической продукции / А. Л. Ахтулов, Л. А. Иванова, А. Е. Любаков, П. В. Одинцов // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования — основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России : материалы Всерос. 65-й науч.-техн. конф. ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием). — Омск : СибАДИ, 2011. — С. 219–224.

АХТУЛОВ Алексей Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), действительный член Международной академии авторов научных открытий и изобретений и Академии проблем качества, почетный работник высшего профессионального образования.

Адрес для переписки: ahtulov-al1949@yandex.ru

АХТУЛОВА Людмила Николаевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством» ОмГУПС.

Адрес для переписки: ahtulova.ludm@yandex.ru

ЛЮБАКОВ Александр Евгеньевич, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС; инспектор отдела надзорной деятельности Советского административного округа г. Омска УГПС МЧС России по Омской области.

Адрес для переписки: lubakov@mail.ru

ИВАНОВА Людмила Алексеевна, кандидат медицинских наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: akludmila@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.08.2015 г.

© А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, А. Е. Любаков, Л. А. Иванова

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ УЛУЧШЕНИЯ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ОРГАНИЗАЦИИ

В статье рассмотрена структура системы управления организацией, интегрировавшая практически все общепризнанные концепции менеджмента на основе улучшения качества, и вопросы создания информационного обеспечения в зависимости от особенностей деятельности организации.

Ключевые слова: организация, система менеджмента, информационное обеспечение, моделирование процесса управления организацией.

В настоящее время широкое использование новейших информационных технологий обеспечивает создание систем менеджмента организации в единой среде (рис. 1) для процессов проектирования [1, 2], производства [3–5], испытаний [6, 7], поставки [8, 9], управления [10, 11] в различных областях деятельности. Системность информационного подхода заключается в охвате всех стадий жизненного цикла — от замысла до утилизации [12].

В соответствии с объективными естественными законами системы менеджмента интегрировали в себе практически все общепризнанные концепции менеджмента (рис. 2), которые ранее считались независимыми друг от друга, а также международные и национальные стандарты в области менеджмента. Это стало возможным благодаря дополняющим их авторским разработкам. В системах менеджмента нет ни одного элемента, не применявшегося ранее в управленческой деятельности, но все они связаны между собой в единую систему, которая до настоящего времени не была описана в специальной литературе. Это стало возможным благодаря точному определению всех ключевых категорий менеджмента, их свойств и методов.

Для любой организации системы менеджмента могут находиться в двух принципиально различных устойчивых состояниях: детерминированном и стохастическом. Для первого характерна полная управляемость, и способность противостоять внешним отклоняющим воздействиям, а также внутренним естественным неравномерностям процессов. Для второго характерно большое количество случайных нежелательных событий, неопределённостей и рисков, не поддающихся планированию и прямому управлению, а также ухудшающих технико-экономические характеристики. Система менеджмента может перейти из детерминированного состояния

в стохастическое в случае, если внешние мешающие воздействия превысят порог устойчивости. Такой переход происходит лавинообразно, после чего в системе менеджмента возникают вторичные источники дезорганизации, которые поддерживают дальнейшее самовоспроизводство потоков случайных событий и не позволяют возвратиться из стохастического состояния к детерминированному.

Детерминированное состояние системы менеджмента обеспечивает максимальную производительность труда, минимальный и стабильный уровень себестоимости, а также полное отсутствие дефектности и рисков. Для стохастического состояния системы менеджмента характерно снижение производительности труда на 40–60 процентов из-за простоев и брака, высокая дефектность продукции из-за вынужденных нарушений технологии и размытости ответственности, высокая и трудно прогнозируемая себестоимость. Попытки улучшения технико-экономических характеристик в таких условиях за счёт ужесточения контроля и административного давления приводят к росту сверхурочных работ персонала; скрытой дефектности продукции; количества заболеваний, связанных со стрессами на работе, и традиционными методами их снятия, а также к другим неблагоприятным последствиям, не поддающимся прямому измерению. Именно такое состояние менеджмента считается естественным для отечественной практики управления.

Незнание естественных законов функционирования организационных систем приводит к неправильному выбору стратегии управления. Вместо устранения внутренних источников дезорганизации и возвращения системы менеджмента в детерминированное состояние с высокими технико-экономическими характеристиками многие организации

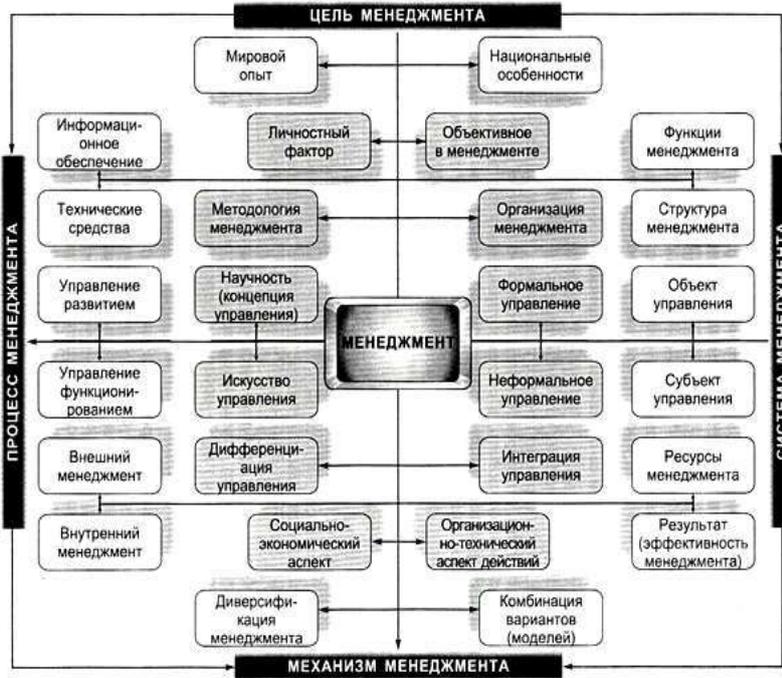


Рис. 1. Схема представления системы менеджмента

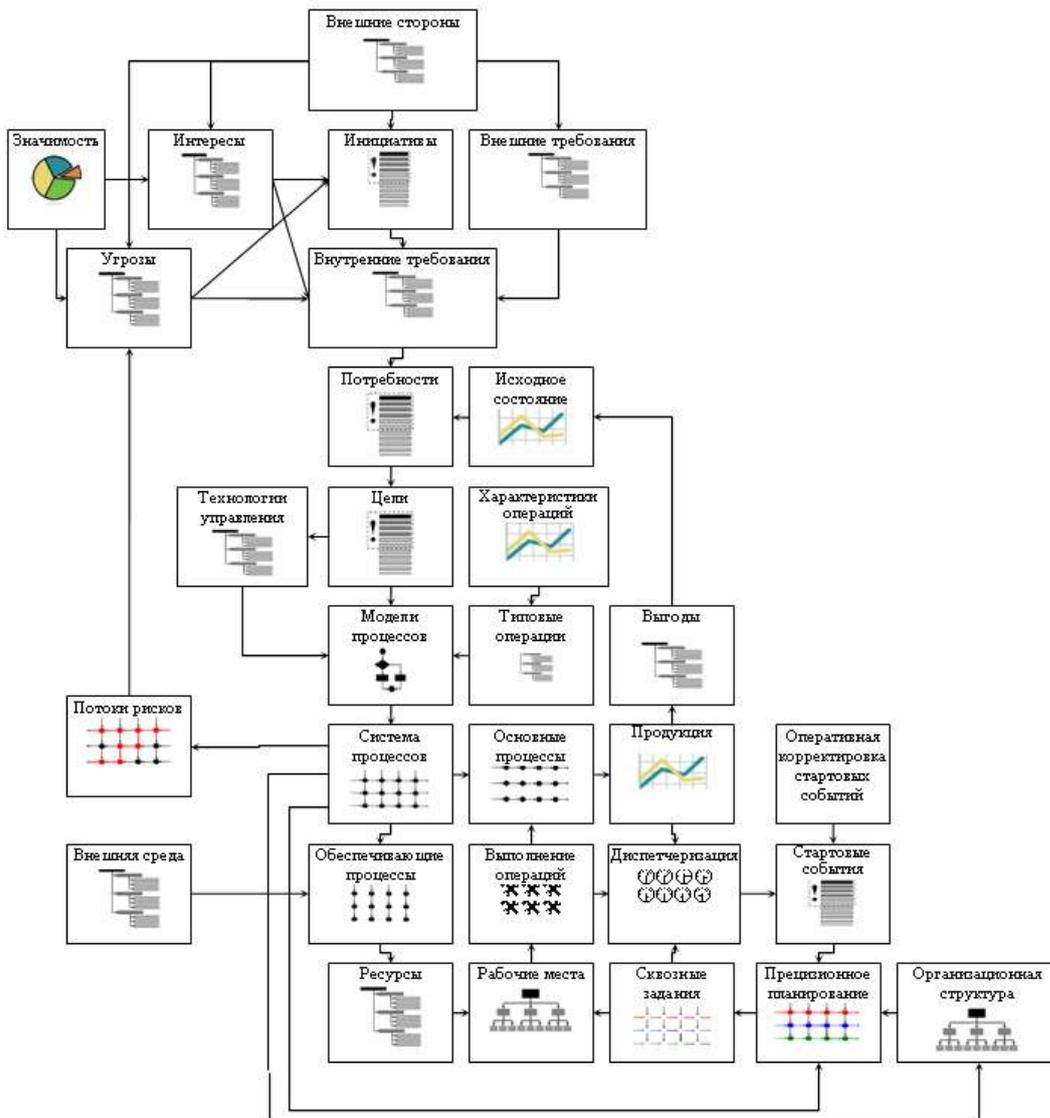


Рис. 2. Блок-схема взаимосвязей в структуре системы менеджмента

действуют в противоположном направлении, культивируя ситуационные бессистемные методы (ручного) управления. Эти методы основаны на том, что проблемы не решаются, а трансформируются, переносятся в будущее или во внешнюю среду, а вся организационная система разлагается до аморфного состояния. Постепенное накопление отложенных организационно-технических проблем приводит к тяжёлым катастрофам, несчастным случаям, ущербу для экологии и другим формам, ухудшающим благополучие всего общества.

Бессистемность управления приводит к тому, что значительная часть выгод от бизнеса возникает за счёт искусства перекалывания собственных проблем на общество и своих работников. Теоретические основы менеджмента и опыт экономически развитых стран показывает, что более значительные выгоды бизнес может получать, не нанося ущерб обществу, а только за счёт совершенства менеджмента.

Менеджмент, как научная категория, развивается циклично, удовлетворяя изменяющиеся потребности в нём. Научный метод состоит из четырёх шагов: сбор эмпирических данных, систематизация знаний, открытие новых законов и синтез новых знаний, пригодных для практического применения. Новые знания эволюционируют и изменяют формуацию практической деятельности, что требует очередного цикла развития, основанного на научном методе. В настоящее время во всей мировой экономике сложилась именно такая ситуация, при которой новая практика менеджмента сформировалась и заняла доминирующее положение, а известные законы уже не позволяют синтезировать недостающие знания для её правильного функционирования. В таких условиях копирование чужого опыта, относящегося к прекратившей своё существование промышленно-экономической формации, не имеет смысла. Необходимо создавать собственную школу менеджмента, проводить масштабные научные исследования в этой области, разрабатывать и распространять передовые технологии управления во всех сферах социально-экономической жизни страны. Тем более что крупные международные компании, которые в рамках ВТО могут стать серьёзными конкурентами для отечественной промышленности, такие работы уже ведутся, и вряд ли обнародуют их результаты, пока они морально не устарели.

В отечественной практике исследованиями в области менеджмента занимаются только энтузиасты частным порядком. Многочисленные консалтинговые организации интересуются только брендовыми концепциями, которые по отдельности совершенно бесперспективны, но хорошо продаются. Частные компании не могут оплачивать или вести самостоятельные исследования в области менеджмента, а гиганты-монополисты вообще не испытывают потребности в них. Многочисленные диссертации в области менеджмента по своему формату, а также сложившейся практике написания и защиты, ориентируются на частности, не затрагивая сущности данной научной области. Многочисленные журналы, публикации, научно-практические конференции создают невообразимую какофонию на тему менеджмента, в которой теряются редкие, действительно ценные идеи.

В условиях рыночной экономики никто не может себе позволить заниматься работой, результаты которой по своей сущности не могут быть товаром

и не могут быть проданы. Несмотря на острую потребность в модернизации менеджмента, её невозможно удовлетворить самостоятельно, за счёт собственных средств и сил без активной роли государства.

Таким образом, модернизация менеджмента может стать главным фактором преодоления последствий экономического кризиса и обеспечения конкурентоспособности в рамках ВТО, но для этого требуется деятельное участие государства в формировании современной национальной школы научно обоснованного менеджмента, а не копирование чужого, морально устаревшего опыта в этой области.

Тенденцией современной промышленно-экономической формации является резкое повышение функциональных возможностей товаров и услуг с одновременным ростом их разнообразия, снижения стоимости и быстрого морального старения. Это сопровождается ещё более быстрым ростом количества измеримых и неизмеримых характеристик товаров и услуг, последние из которых проявляются только в процессе эксплуатации или потребления и могут быть источником рисков для жизни и здоровья. Современный потребитель имеет всё меньше времени на всестороннюю оценку качества покупки и относится к ней менее критично. При сохранении этой тенденции в ближайшем будущем основным критерием конкурентоспособности для большинства потребителей будет цена, а также небольшое количество очевидных характеристик и функциональных возможностей товаров и услуг.

Все измеримые и неизмеримые характеристики продукции однозначно определяются технологиями их создания, стабильность которых, в свою очередь, зависит от уровня менеджмента организации. Несовпадения измеримых характеристик легко выявляются и устраняются в процессе производства, что не позволяет впоследствии правильно оценивать реальную безопасность продукции ни потребителю, ни внешним надзорным органам. Концепция контроля над производителями, основанная на экспертной роли потребителей и контролирующей роли надзорных органов, возникла во времена, когда товары и услуги были простыми, а их нежелательные характеристики было проще и дешевле исправить, чем предупредить. В настоящее время ситуация принципиально изменилась, техногенный потенциал общества достиг критического уровня и нежелательные характеристики товаров и услуг могут быть причиной катастроф. В таких условиях проще и дешевле предупреждать проблемы, чем устранять их последствия.

Сочетание перечисленных факторов и тенденций приводит к тому, что в современной промышленно-экономической формации роль конкуренции и внешнего надзора в обеспечении безопасности продукции будет неуклонно снижаться, уступая место контролю над системами менеджмента организации.

По такому пути пошли экономически развитые страны более 30 лет назад, когда начали создавать международные стандарты на системы менеджмента, первыми из которых были стандарты ISO серии 9000, выпущенные в 1994–1995 годах. Универсальность этих стандартов обеспечивается абстрактностью формулировок и использованием только бесспорных требований, справедливость которых основана на успешном опыте международной практики большого числа организаций, в том числе и России.

Применение практики стандартизации менеджмента в отечественных условиях себя не оправдало. Это связано с тем, что международные стандарты предназначены для применения в условиях детерминированного менеджмента, характерного для экономически развитых стран, а не стохастического, доминирующего в отечественной практике. За десятки лет поголовной сертификации отечественных предприятий качество их продукции, безопасность труда и экологии, энергоэффективность, а также уровень социальной ответственности не улучшились, что свидетельствует о повсеместном неправильном применении международных стандартов. Причиной этого является сложившаяся практика сертификации, при которой под предлогом выборочности проверки оцениваются только второстепенные характеристики менеджмента и никогда главная — политика управления и механизмы принятия управленческих решений. Фактически это прямое нарушение международных [13, 14] и национальных стандартов [15–17] в области менеджмента, которое стало возможным из-за пассивности государства в этой области. Конкуренция между органами по сертификации, которые являются частными компаниями, привела к тому, что они соревнуются между собой в либерализации условий торговли сертификатами в ущерб интересам общества, которое вводится в заблуждение относительно безопасности сертифицированной продукции.

Отправной точкой любой системы менеджмента является механизм принятия управленческих решений и политика управления. Их непрозрачность является признаком того, что они противоречат общепринятым нормам поведения или даже действующему законодательству.

Международные стандарты в области менеджмента основаны на добровольном обеспечении прозрачности мотивов и механизмов высшего руководства, что является необходимым и достаточным условием для правильного функционирования всей системы менеджмента и общественной полезности конечной продукции. Для существующей в настоящее время отечественной практики управления прозрачность управления оказывается недостижимой, а вместо неё действует правило: «Думаем одно, говорим другое, делаем третье, а в результате получаем — четвертое».

В современной промышленно-экономической формации конкуренция и надзор за конечным результатом деятельности не позволяют защитить общество от рисков и опасностей, возникающих из-за недобросовестного менеджмента. Для реализации мирового опыта по контролю истоков управленческих решений и обеспечению прозрачности всего менеджмента необходима система государственных стандартов в области менеджмента, более конкретных и понятных, чем международные, но не противоречащие им, а также доступные технологии их внедрения.

Из приведённых выше аргументов следует, что направление вектора общественной полезности любого бизнеса и деятельности государственных органов власти зависит от состоятельности менеджмента. В настоящее время этот вектор направлен в сторону, не совпадающую с интересами общества. Но это не вина, а беда предпринимателей и руководителей, которые не могут самостоятельно и без помощи государства обеспечить оптимизацию организационных систем и модернизацию менеджмента.

Позитивными предпосылками для решения данной проблемы является то, что они осознают необходимость перемен, а также признают право общества и государства на социально-экономическое благополучие. Этих предпосылок в совокупности с активной позицией государства было бы достаточно для реализации национальной программы модернизации менеджмента, основанной на научном методе.

Библиографический список

1. Ахтулов, А. Л. Методология построения и практическое применение системы автоматизации проектирования транспортных машин / А. Л. Ахтулов // Вестник СибАДИ. — Омск : Издат. дом ЛЕО, 2005. — Вып. 3. — С. 14–29.
2. Ахтулов, А. Л. Методика оценки качества процессов проектирования сложных технических устройств / А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, А. В. Леонова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 3 (123). — С. 87–91.
3. Ахтулова, Л. Н. Управление несоответствиями в серийных технологических процессах промышленного предприятия / Л. Н. Ахтулова, О. В. Дежурова, Д. А. Грюнер // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2009. — № 3 (83). — С. 149–153.
4. Ахтулов, А. Л. Использование карт потока создания ценности как средство постоянного улучшения деятельности организации / А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, Т. И. Стадольская // Омский научный вестник. Сер. Общество. История. Современность. — 2013. — № 5 (122). — С. 40–46.
5. Ахтулова Л. Н. Алгоритм прогнозирования несоответствий в модели улучшения качества серийных процессов производства / Л. Н. Ахтулова, О. В. Дежурова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 1 (87). — С. 105–109.
6. Ахтулов, А. Л. Измерение результативности системы менеджмента качества как инструмент совершенствования деятельности организации / А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, А. Ю. Мустакова, С. Т. Ташмагамбетова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 1 (117). — С. 132–136.
7. Ахтулова, Л. Н. Идентификация процессов системы менеджмента качества промышленного предприятия / Л. Н. Ахтулова, А. М. Суртаев // Омский научный вестник. Сер. Общество. История. Современность. — 2009. — № 1 (75). — С. 84–86.
8. Ахтулов, А. Л. Система управления ресурсами предприятия с использованием информационных технологий / А. Л. Ахтулов, В. В. Слободин // Омский научный вестник. — 2005. — № 2 (31). — С. 202–207.
9. Ахтулов, А. Л. Логистический аутсорсинг как основное направление обеспечения качества процесса цепей поставок в деятельности организации / А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, Н. А. Чанчибадзе, С. В. Лумпова // Омский научный вестник. Сер. Общество. История. Современность. — 2013. — № 2 (116). — С. 61–63.
10. Ахтулов, А. Л. Система менеджмента качества как основа конкурентоспособности коммерческого банка / А. Л. Ахтулов, Е. Ю. Бирюкова // Вестник Ижевского гос. техн. ун-та. — 2009. — № 4 (44). — С. 78–79.
11. Ахтулов, А. Л. Особенности разработки руководства по качеству для органа местного самоуправления / А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, А. Ю. Кривун // Омский научный вестник. Сер. Общество. История. Современность. — 2013. — № 3 (119). — С. 56–58.
12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. — Введ. 2005–12–29. — М. : Стандартиформ, 2004. — 57 с.

13. BS 25999—1:2006. Управление непрерывностью бизнеса. Ч. 1. Практические правила. — М. : Стандартинформ, 2007. — 34 с.

14. BS 25999-2:2007. Управление непрерывностью бизнеса. Ч. 2. Спецификация управления непрерывностью бизнеса. — М. : Стандартинформ, 2011. — 34 с.

15. ГОСТ ISO 9000—2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. — Введ. 2013—01—01. — М. : Стандартинформ, 2012. — 32 с.

16. ГОСТ ISO 9001—2011. Системы менеджмента качества. Требования. — Введ. 2013—01—01. — М. : Стандартинформ, 2012. — 36 с.

17. ГОСТ Р ИСО 9004-2010. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества. — Введ. 2010—11—23. — М. : Стандартинформ, 2011. — 46 с.

АХТУЛОВ Алексей Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского го-

сударственного университета путей сообщения (ОмГУПС), действительный член Международной академии авторов научных открытий и изобретений и Академии проблем качества, почетный работник высшего профессионального образования.

АХТУЛОВА Людмила Николаевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством» ОмГУПС.

БУЛАХОВА Наталья Витальевна, аспирантка кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС.

БУЛАХОВА Юлия Витальевна, аспирантка кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС.

БУЛАХОВ Виталий Анатольевич, заместитель директора ООО «Infi Net Wireless», г. Екатеринбург.

Адрес для переписки: ahtulov-al1949@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14.09.2015 г.

© А. Л. Ахтулов, Л. Н. Ахтулова, Н. В. Булахова,

Ю. В. Булахова, В. А. Булахов

УДК 621.752.3

**Ю. А. БУРЬЯН
С. Н. ПОЛЯКОВ
М. В. СИЛКОВ
Д. О. БАБИЧЕВ**

Омский государственный
технический университет
Научно-производственное
предприятие «Прогресс», г. Омск

ПНЕВМОИЗОЛЯТОР С ИНЕРЦИОННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДВИЖЕНИЯ

В статье рассмотрены принцип построения и математическая модель низкочастотной виброизоляционной опоры, состоящей из инерционного преобразователя движения на базе резинокордной оболочки, заполненной жидкостью, и гидропневматического аккумулятора. В работе показано, что согласованием характеристик гидропневматического аккумулятора и гидравлического инерционного преобразователя движения можно получить высокоэффективные низкочастотные виброизоляторы для вывешивания силовых агрегатов в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: виброизоляция, резинокордная оболочка, амортизатор, преобразователь движения, гидропневматический аккумулятор.

В работе рассмотрены принцип построения и математическая модель низкочастотной виброизоляционной опоры, состоящей из гидропневмоаккумулятора и гидравлического инерционного преобразователя движения на базе резинокордной оболочки (РКО), заполненной жидкостью.

Пневматические упругие элементы на базе резинокордных оболочек давно и с успехом применяются в качестве виброизоляционных опор в различных отраслях промышленности. Их широкое применение обусловлено тем, что они обладают рядом уникальных положительных качеств:

— низкие частоты собственных колебаний;

— возможность регулирования характеристик (жёсткость, нагрузочная способность);

— надёжность и длительность эксплуатации и т.д.

Характеристики пневмоамортизатора могут быть значительно улучшены при использовании вместе с пневмоэлементом гидравлического инерционного преобразователя движения на базе РКО, заполненной жидкостью. В этом случае имеется возможность варьирования в широких пределах характеристиками инерционных трубок вследствие достаточно большого объёма РКО с жидкостью, и при этом сохраняются достоинства освоенных

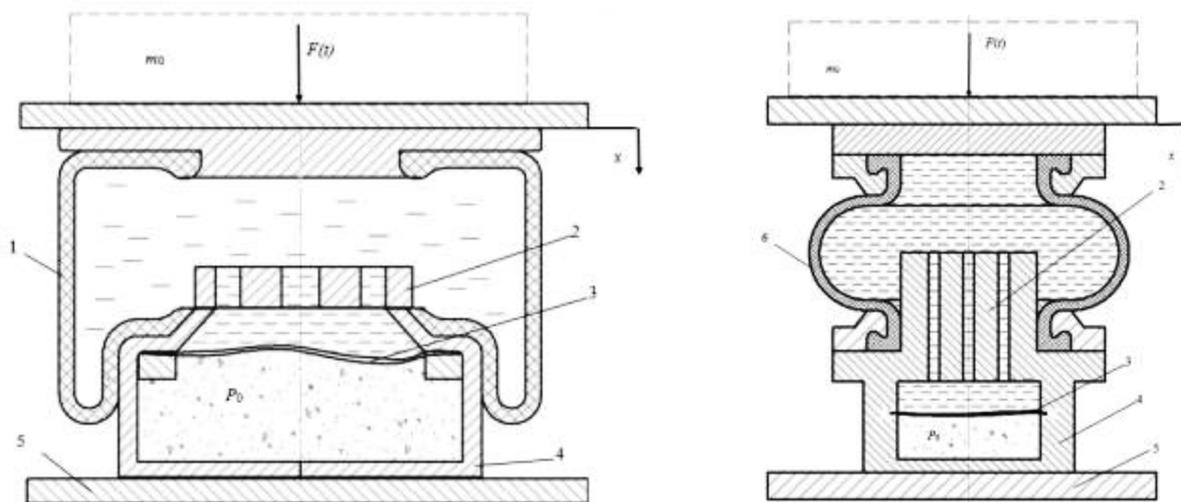


Рис. 1. Принципиальные схемы пневмовиброизолятора:
 1 — РКО Н-48; 2 — блок инерционных трубок; 3 — диафрагма; 6 — РКО И-09;
 4 — гидропневматический аккумулятор; 5 — основание;
 P_0 — давление в гидропневматическом аккумуляторе;
 $F(t)$ — сила, действующая со стороны виброактивного агрегата

промышленностью, надёжных и долговечных РКО. Методы расчёта и результаты экспериментальных работ по гидроопорам с гидравлическими инерционными преобразователями движения, или по терминологии (1) гидравлическими инерционными трансформаторами (ГИТ) достаточно полно изложены в работах Института машиноведения им. Благонравова [1, 2].

Анализ резинокордных виброопор с ГИТ, в которых в одном конструктиве параллельно установлены гидравлический инерционный преобразователь движения на базе РКО с жидкостью и резинометаллический или пневматический амортизатор приведён в работах [3, 4].

Принципиальные схемы пневмовиброизолятора с ГИТ на базе РКО модели Н-48, И-09 и гидропневмоаккумулятором приведены на рис. 1.

Необходимо отметить, что пневмовиброизоляторы с ГИТ могут быть организованы и на базе других РКО.

Принцип действия рассматриваемой опоры с ГИТ заключается в том, что при действии на опору периодического усилия от виброактивного силового агрегата жидкость в ГИТ и, следовательно, в инерционных трубках будет совершать возвратнопоступательное движение. Диафрагма 3 и ёмкость гидропневматического аккумулятора с давлением P_0 служит для компенсации объёма вытесняемой жидкости при перемещении опорной поверхности по отношению к основанию, и для создания силы упругости и силы, компенсирующей массу вывешиваемого тела. Масса жидкости в инерционных трубках имеет скорость, большую чем скорость опорной поверхности на величину, равную отношению площади условного поршня, перемещающего жидкость (в первом приближении площадь эквивалентного сечения РКО), к площади сечения инерционной трубки. Вследствие этого на силовой агрегат и основание будет действовать дополнительная инерционная нагрузка с приведённой массой, на 2–3 порядка превышающей массу жидкости в инерционных трубках. Динамический эффект от этой инерционной нагрузки будет заключаться,

как это показано в [1–3], в значительном снижении передачи вибрационного усилия на основание в области частот настройки виброопоры с ГИТ.

Необходимо отметить, что инерционные трубки при малом диаметре могут обеспечивать демпфирование в опоре, хотя известно, что для целей виброизоляции, т.е. для уменьшения передачи усилия на основание, демпфирование должно быть малым.

Для кинетической энергии жидкости в ГИТ можно записать [3]

$$T = m \frac{\dot{x}^2}{2} + m_k \frac{V_{тр}^2}{2}, \quad (1)$$

где \dot{x} — скорость перемещения массы m_0 ;

m — масса жидкости в полостях опоры;

m_k — масса жидкости в инерционной трубке;

$V_{тр}$ — скорость жидкости в трубке.

Учитывая, что $V_{тр} = \dot{x} \cdot \frac{A}{S_{тр}}$, где A — площадь поршня, $S_{тр}$ — суммарная площадь сечения инерционных трубок, инерционная составляющая будет иметь вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) = m_{пр} \cdot \ddot{x}, \quad (2)$$

где $m_{пр} = m_k \frac{A^2}{S_{тр}^2} + m$.

Демпфирование в опоре из-за движения жидкости в ГИТ в первом приближении при условии ламинарного движения можно оценить по коэффициенту проводимости инерционной трубки [5]

$$K_{пр} = \frac{\pi d_{тр}^4}{128 \mu l}, \quad (3)$$

где μ — динамическая вязкость жидкости (Па·с);

$d_{тр}, l$ — диаметр и длина трубки.

Из условия равенства расходов имеем:

$$K_{пр} \Delta p = S_{тр} \dot{x}_{\Delta p},$$

где Δp — перепад давления из-за сопротивления $F_{сопр}$ в дросселе; $\dot{x}_{\Delta p} = \frac{A}{S_{тр}} \dot{x}$, а если учесть,

что $\Delta p = \frac{F_{\text{сопр}}}{A}$, то получим:

$$F_{\text{сопр}} = b_{\text{пр}} \dot{x}, \quad (4)$$

$$\text{где } b_{\text{пр}} = \frac{A^2}{S_{\text{тр}}^2} \pi \cdot 8 \cdot \mu \cdot \ell.$$

При колебаниях массы m_0 около положения статического равновесия можно записать:

$$m_0 \ddot{x} = F(t) - A(x) \cdot P_1, \quad (5)$$

где $A(x)$ — эквивалентная площадь РКО;

P_1 — давление жидкости в РКО.

Полагая, что давление жидкости в РКО в основном определяется давлением в газовой полости, инерционным воздействием от $m_{\text{пр}}$ и сопротивлением в дросселе для P_1 можно записать [6]

$$P_1 = (P_{\text{го}} + P_a) \left[\frac{V_{\text{го}}}{V_{\text{го}} - \int_0^x A(x) dx} \right]^n - P_a + \frac{m_{\text{пр}} \cdot \ddot{x}}{A(x)} + \frac{b_{\text{пр}}}{A(x)} \cdot \dot{x}, \quad (6)$$

где $P_{\text{го}}$ — начальное давление в газовой полости;

P_a — атмосферное давление;

$V_{\text{го}}$ — начальный объём газовой полости;

n — показатель политропы.

В первом приближении при малости перемещений при вибрационных нагрузках можно полагать, что $A(x) = \text{const}$ и для составления математической модели можно условно разделить упругую составляющую в гидропневмоаккумуляторе и инерци-

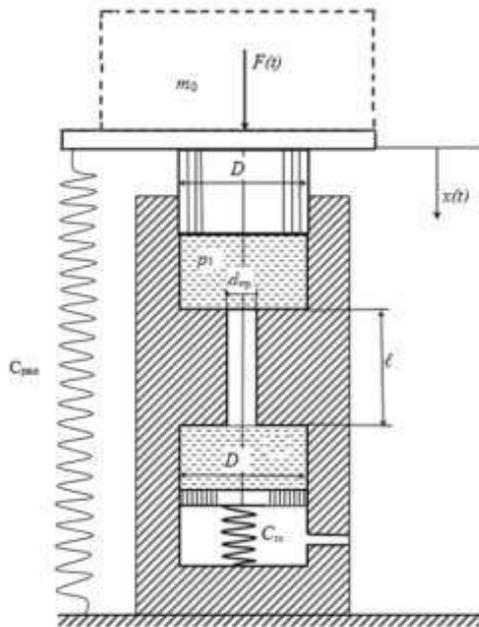


Рис. 2. Принципиальная схема разделения упругой и инерционной составляющей:

$C_{\text{рко}}$ — коэффициент жесткости резинокордной составляющей в ГИТ; $F(t)$ — внешняя сила; m_0 — масса инерционной нагрузки на виброопору; D и $d_{\text{пр}}$ — соответственно диаметр условного поршня и инерционной трубки; C — эквивалентная жесткость гидропневматического аккумулятора; l — длина инерционной трубки; p_1 — давление РКО

онную, связанную с ГИТ. Принципиальная схема раздельного представления упругой и инерционной составляющей показана на рис. 2.

При сделанных выше допущениях для динамических расчётов можно принять, что

$$A \cdot P_1 = C_1 \cdot x, \quad (7)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{(P_{\text{го}} + P_a) \cdot A^2}{V_{\text{го}}} + C_{\text{рко}}.$$

Дифференциальное уравнение, описывающее поведение опоры при однонаправленном движении в соответствии с (5), (6), (7) будет иметь вид:

$$m_0 \ddot{x} = F(t) - C_1 x - b_{\text{пр}} \dot{x} - m_{\text{пр}} \ddot{x}. \quad (8)$$

Уравнение (8) запишем в виде:

$$(m_0 + m_{\text{пр}}) \ddot{x} + b_{\text{пр}} \dot{x} + C_1 x = F(t). \quad (9)$$

Усилие $R(t)$, передаваемое через опору на основание, будет определяться уравнением:

$$m_{\text{пр}} \ddot{x} + b_{\text{пр}} \dot{x} + C_1 x = R(t). \quad (10)$$

Комплексный коэффициент передачи усилия на основание через виброизоляционную опору будет иметь вид:

$$K_{\text{п}}(i\omega) = \frac{R(i\omega)}{F(i\omega)} = \frac{[C_1 - m_{\text{пр}} \omega^2] + b_{\text{пр}} i\omega}{[C_1 - (m_0 + m_{\text{пр}}) \omega^2] + b_{\text{пр}} i\omega}. \quad (11)$$

Вычисляя модуль, в выражении (11) можно записать:

$$K_{\text{п}} = \sqrt{\frac{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + 4n_1^2 \omega^2}{(\omega_{01}^2 - \omega^2)^2 + 4n_{01}^2 \omega^2}} \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{m_0 + m_{\text{пр}}}, \quad (12)$$

где обозначено: $\omega_{01}^2 = \frac{C_1}{m_0 + m_{\text{пр}}}$; $\omega_1^2 = \frac{C_1}{m_{\text{пр}}}$;

$$n_{01} = \frac{b_{\text{пр}}}{2(m_0 + m_{\text{пр}})}; \quad n_1 = \frac{b_{\text{пр}}}{2m_{\text{пр}}}.$$

Переходя к безразмерным координатам по зависимостям $Z = \frac{\omega}{\omega_0}$; $v_1 = \frac{n_1}{\omega_0}$; $v_{01} = \frac{n_{01}}{\omega_0}$; $\omega_0^2 = \frac{C}{m_0}$ и после преобразования выражения (12) запишем $K_{\text{п}}$ в зависимости от соотношения $n = \frac{m_0}{m_{\text{пр}}}$

$$K_{\text{п}} = \sqrt{\frac{(Z^2 - n)^2 + 4v_1^2 Z^2}{\left(Z^2 - \frac{n}{n+1}\right)^2 + 4v_{01}^2 Z^2}} \cdot \frac{1}{n+1}. \quad (13)$$

Если ввести величину $v_0 = \frac{b_{\text{пр}}}{2m_0 \omega_0}$ и выразить v_1 и v_{01} через v_0 , то вместо (13) получим:

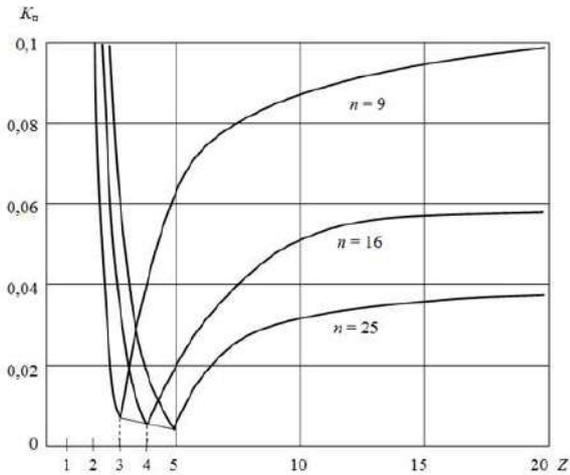
$$K_{\text{п}} = \sqrt{\frac{(Z^2 - n)^2 + 4v_0^2 n^2 Z^2}{\left(Z^2 - \frac{n}{n+1}\right)^2 + 4v_0^2 \left(\frac{n}{n+1}\right)^2 Z^2}} \cdot \frac{1}{n+1}. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что частота настройки $\omega_{\text{наст}}$ опоры определяется равенством $Z = \sqrt{n}$ или $\omega_{\text{наст}} = \omega_0 \sqrt{n}$. Представляет интерес оценить

Таблица 1

Зависимость коэффициента передачи от параметров подвески

n	$v_0 = 0,001$		$v_0 = 0,01$	
	$Z = \sqrt{n}$	$Z \rightarrow \infty$	$Z = \sqrt{n}$	$Z \rightarrow \infty$
4	10^{-3}	0,2	10^{-2}	0,2
9	$6,6 \times 10^{-4}$	0,1	$6,6 \times 10^{-3}$	0,1
16	5×10^{-4}	0,058	5×10^{-3}	0,06
25	4×10^{-4}	0,038	4×10^{-3}	0,038

Рис. 3. Графики зависимости K_n (Z)

эффективность виброизоляции (величина K_n) в точке настройки, при $Z \rightarrow \infty$ и от величины v_0 .

Результаты расчётов K_n представлены в табл. 1.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента передачи K_n от Z при различных величинах n и при коэффициенте демпфирования $v_0 = 0,01$.

Анализ (табл. 1) показывает, что при интегральной оценке эффективности виброизоляции виброопоры с ГИТ оптимальное значение n лежит в пределах 4–25, т.к. при меньших n возрастает ошибка при больших частотах ($Z \rightarrow \infty$), а при больших n влияние дополнительной инерционной нагрузки от ГИТ уменьшается и характеристики опоры приближаются к обычным упругим элементам, кроме того, при больших n частота точной настройки удаляется от f_0 .

Например, если в качестве РКО с жидкостью использована оболочка И-09, то при давлении газовой полости 1 атм., диаметре и высоте гидропневматического аккумулятора соответственно 0,1 м и 0,05 м при $S_{зф} = 5 \cdot 10^{-3}$ м² нагрузочная способность составит 50 кгс. При параметрах инерционных трубок $d_{mp} = 0,01$ м, $l = 0,05$ м приведённая масса составит 16 кг. Жёсткость опоры будет иметь величину $C_l = 0,9 \cdot 10^4$ Н/м.

Полагая $m_0 = 70$ кг, частота собственных колебаний опоры $f_0 = 1,8$ Гц, а величина $v_0 \approx 0,001$.

Частота настройки такой опоры равна ($n = 2,09$) $f_n = 3,76$ Гц, на которой величина коэффициента передачи усилия на основании $K_n = 10^{-3}$.

Необходимо отметить, что при проектировании рассматриваемой опоры путём варьирования параметрами инерционных трубок и гидропневмоаккумулятора можно в достаточно широких пределах изменять величину « n », а следовательно, и частоту настройки f_n .

Таким образом, проведённое в работе предварительное исследование виброизоляционной опоры, состоящей из гидравлического инерционного преобразователя движения на базе РКО, заполненного жидкостью, и гидропневмоаккумулятора, показало, что с использованием серийно выпускаемых РКО возможно проектировать и изготавливать высокоэффективные низкочастотные виброизоляторы, обладающие свойством настройки на частоту с минимальным ($\sim 10^{-3}$) значением коэффициента передачи усилия на основании для вывешивания силовых агрегатов в различных отраслях промышленности и судостроения.

Библиографический список

1. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б. А. Гордеев [и др.]. — М.: Физматлит, 2004. — 176 с.
2. Мугин, О. О. Экспериментальные исследования виброизолятора с преобразованием движения инерционных элементов / О. О. Мугин, А. А. Синёв // Вестник научно-технического развития. — 2012. — № 4 (56). — С. 24–31.
3. Бурьян, Ю. А. Резинокордная пневмогидравлическая опора с инерционным преобразователем движения / Ю. А. Бурьян, С. Н. Поляков, Ю. П. Комаров // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 3 (123). — С. 68–72.
4. Бурьян, Ю. А. Виброизоляционная опора с гидравлическим инерционным преобразователем движения на базе резинокордной оболочки / Ю. А. Бурьян, Ю. Ф. Галуза, С. Н. Поляков // Судостроение. — 2014. — № 1. — С. 40–42.
5. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д. Н. Попов. — М.: Машиностроение, 1987. — 464 с.
6. Трибельский, И. А. Расчётно-экспериментальные методы проектирования сложных резинокордных конструкций / И. А. Трибельский, В. В. Шалай, А. В. Зубарев, М. И. Трибельский. — Омск: ОмГТУ, 2011. — 238 с.

БУРЬЯН Юрий Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Основы теории механики и автоматического управления» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

ПОЛЯКОВ Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), научный сотрудник Научно-производственного предприятия «Прогресс» (НПП «Прогресс»).

СИЛКОВ Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Основы теории механики и автоматического управления» ОмГТУ.

БАБИЧЕВ Денис Олегович, инженер-конструктор 1-й категории НПП «Прогресс».

Адрес для переписки: burian@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 16.09.2015 г.

© Ю. А. Бурьян, С. Н. Поляков, М. В. Силков, Д. О. Бабичев

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА, ПОЛУЧЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ПП-25Х15МГСФР, ЛЕГИРОВАННОЙ КАРБИДОМ БОРА

Приведены результаты исследования структуры свойств металла при наплавке порошковой проволокой ПП-25Х15МГСФР с дополнительным введением соединений карбидов бора. Установлено, что введение карбидов бора в данную проволоку обеспечивает получение наплавленного металла со стабильной структурой и свойствами независимо от технологических режимов наплавки, а также повышает его показатели теплостойкости. Данная проволока рекомендуется для повышения стойкости инструмента горячего деформирования металла.

Ключевые слова: порошковая проволока, бориды, наплавленный металл, твердость, теплостойкость.

Для изготовления листового проката методом горячего деформирования на прокатных машинах применяют валки, во многих случаях изготавливаемые из сталей марок 45ХНМ, 45ХНВ, и т.п. Большое распространение данных сталей объясняется тем, что они обладают достаточно высоким комплексом эксплуатационных и технологических свойств и, кроме того, имеют относительно низкую стоимость и не дефицитны. Однако износостойкость валков изготовленных из стали 45ХНМ остается на достаточно низком уровне. Поэтому в прокатном производстве машиностроительных предприятий проблема повышения эффективности листопркатной оснастки является одной из важнейших [1].

Как известно, доля изнашиваемого металла в массе всего валка составляет не более 3... 10 %, поэтому эффективно применение высокопрочных материалов при восстановительной наплавке его рабочих поверхностей. Кроме того, процессы наплавки позволяют упрочнять не только новые валки различного назначения, но и дают возможность многократно ремонтировать изношенные инструменты при минимальных материальных затратах [2].

В качестве наплавочных материалов для упрочнения прокатных валков применяют ПП-Нп25Х5ФМС, Нп-40Х16МГСФР, УТР А 694 (30Х2В5Ф), Dualhard DN-О (30Х13Н5К2ГМВФСА), 60Х6Н3МЗРЮФТ, Duroterm 8R (15Х3В4Ф), Lincor 102/802 (45Х6М2В2ГС) и др. Основными недостатками данных материалов являются необходимость предварительного подогрева перед наплавкой до высокой температуры (300–500 °С), обязательной операции отжига наплавленного слоя для обеспечения его возможности последующей механической обработки режущим инструментом и последующей закалки с отпуском для повышения прочност-

ных свойств. Наиболее перспективными являются проволоки Endotec DO*04 (15Х13К12М2СГ) и ОК Tubrodur 15.72S (06Х12Н4МГСБФА), не требующие высокотемпературной термической обработки и обеспечивающие высокую стабильность свойств наплавленного металла по всей восстанавливаемой рабочей поверхности [3–8].

Однако данные марки проволок выпускаются зарубежными производителями, что, в связи с нынешней экономической ситуацией, требует импортозамещения.

Из материалов российского производства близкие свойства наплавленного металла достигаются при использовании сплошной наплавочной проволоки Нп-25Х15МГСФР [9]. В то же время получаемый наплавленный металл обладает низкими показателями теплостойкости.

В связи с вышеизложенным, в работе проведены исследования структуры и свойств наплавленного металла, полученного порошковой проволокой аналогичного состава, дополнительно легированной карбидом бора.

Наплавку проводили в аргоне опытной порошковой проволокой диаметром 2,4 мм в 3 слоя на пластины из стали 45ХНМ размером 200×50×10 мм с предварительным подогревом при температуре 300 °С и без него. Режим наплавки: сила тока 230 А; напряжение дуги 24 В; скорость наплавки 20 м/ч.

Металлографические исследования наплавленного металла проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver 10m. Микроструктура выявлялась химическим травлением в реактивах составов: CuSO_4 — 4 г; HCl — 20 мл; H_2O — 20 мл и 4 %-ным раствором азотной кислоты. ДюрOMETрические испытания

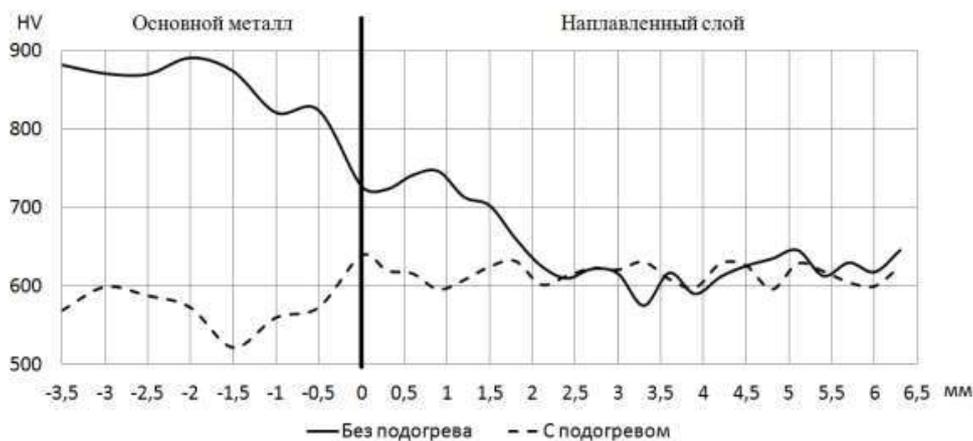
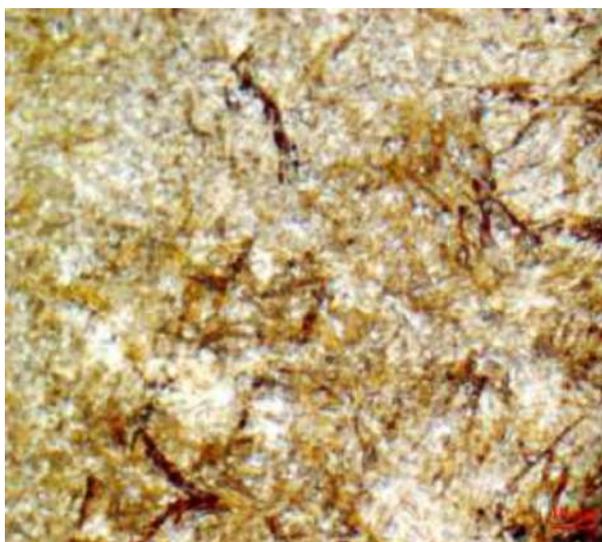
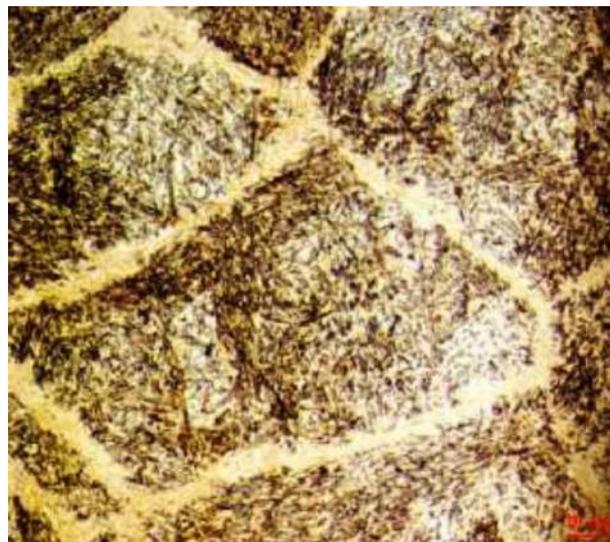


Рис. 1. Твердость образцов после наплавки



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура стали 45ХНМ после наплавки:
а — без подогрева (x1000); б — с подогревом (x500)

проводили с помощью твердомеров Shimadzu HMV-2 (нагрузка $P = 200$ г, шаг 200 мкм) и ТК-2.

Теплостойкость наплавленного металла оценивали по изменению его твердости после отпуска в интервалах температур от 400 до 700 °С при выдержке 2 часа. Для сравнения проводили исследования отпускной способности стали 45ХНМ и наплавленного металла, полученного порошковой проволокой Endotec DO*04.

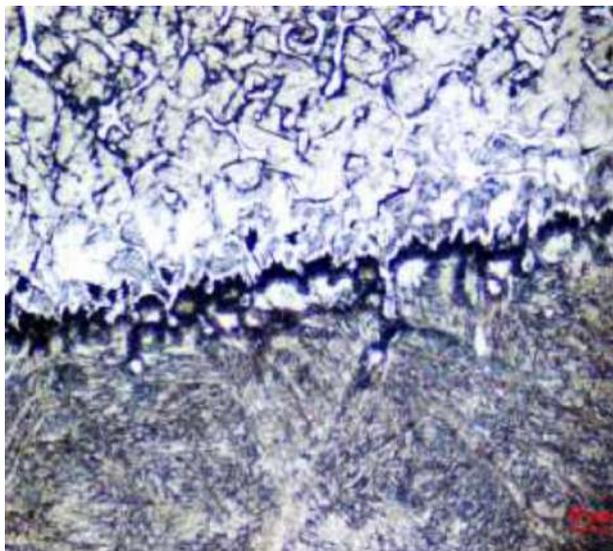
Результаты проведенных исследований показали, что изменение твердости наплавленного предварительно подогретого образца изменяется от 595 до 638 HV (рис. 1). В то же время значение твердости наплавленного образца без предварительного подогрева имеет большое различие между основным металлом и наплавленным слоем. Так, твердость стали 45ХНМ находится в пределах от 750 HV до 900 HV, а твердость первого наплавленного слоя составляет от 625 до 725 HV, а в последующих слоях твердость металла находится в пределах от 575 до 645 HV.

Металлографические исследования показали, что структура стали 45ХНМ после наплавки без по-

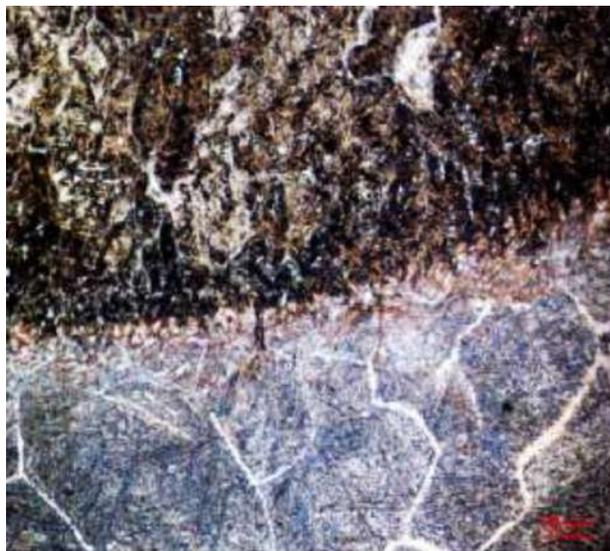
догрева представляет собой характерное игольчатое строение, преимущественно из мартенсита, который находится в кристаллографических плоскостях аустенита (рис. 2а), что и определяет высокое значение твердости. После наплавки с предварительным подогревом данная сталь имеет перлитно-мартенситную структуру с остаточным аустенитом по границам (рис. 2б).

При изучении образцов наплавленных без предварительного подогрева в структуре стали 45ХНМ переходной зоны обнаружена явно выраженная линия сплавления с большим количеством скопленных карбидов хрома, что значительно снижает её прочность и способствует повышению хрупкости, а также провоцирует развитие трещин (рис. 3а), снижающих работоспособность наплавленных деталей.

Результаты исследования структуры металла наплавленного с предварительным подогревом показали отсутствие резко выраженной линии сплавления в переходной зоне между сталью 45ХНМ (рис. 3б), что уменьшает риск возникновения трещин в процессе эксплуатации восстановленного инструмента.

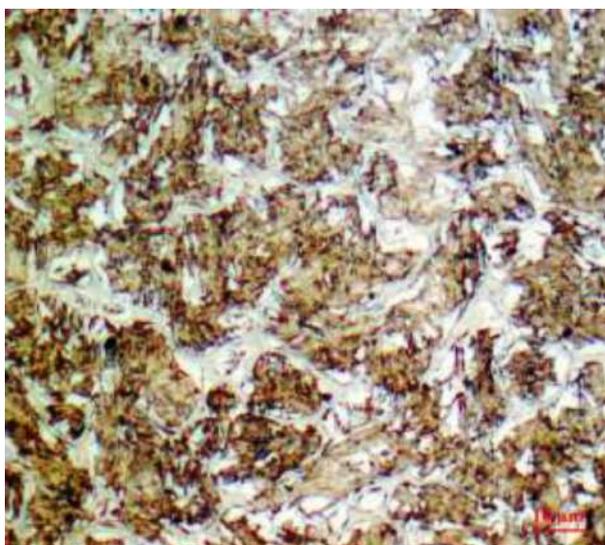


а)

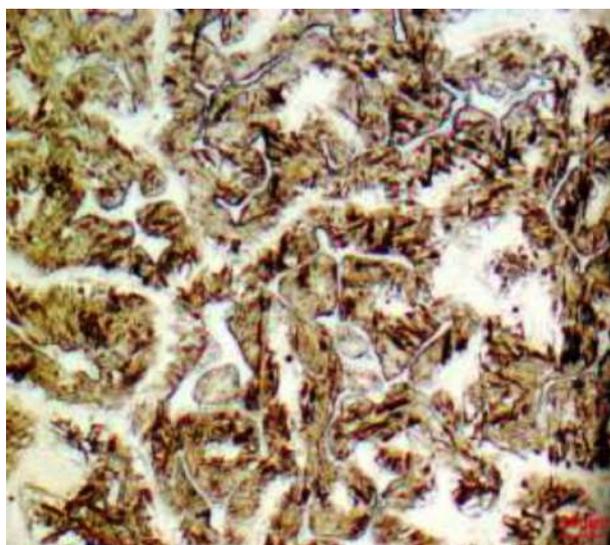


б)

Рис. 3. Зона сплавления после наплавки:
а) без подогрева (x500); б) с подогревом (x200)



а)



б)

Рис. 4. Наплавленный слой после наплавки:
а) без подогрева (x1000); б) с подогревом (x1000)

Наплавленный металл, полученный порошковой проволокой ПП-25Х15МГСФР с карбидом бора, имеет мартенситную структуру с включениями карбоборидных фаз и равномерно распределенной эвтектики, как с предварительным подогревом, так и без него (рис 4). Это определяет стабильность структуры наплавленного металла, полученного данной порошковой проволокой, вне зависимости от различных технологических параметров наплавки, а следовательно, и стабильность его механических свойств [10].

Как показали испытания теплостойкости, по степени разупрочнения металл наплавленный порошковой проволокой ПП-25Х15МГСФР с карбидом бора при температурах до 600 °С находится на уровне металла, наплавленного порошковой проволокой Endotec DO*04, а при более высоких температурах

значительно превосходит все исследуемые материалы (табл. 1).

Такие значения теплостойкости исследуемых сталей можно связать с их различием в составе и характере образующихся упрочняющих фаз, а также предельной температурой фазовых $\alpha \leftrightarrow \gamma$ — превращений [11]. Сталь 45ХНМ в состоянии перед испытанием имеет мартенситную структуру упрочненную карбидами цементитного типа Me_3C . При температурах свыше 550 °С в структуре такого металла происходит распад карбидов с образованием участков перлита и стабилизацией остаточного аустенита, что и определяет низкие показатели теплостойкости стали.

Металл, наплавленный порошковой проволокой Endotec DO*04, имеет структуру высокохромистого мартенсита, упрочненного выделениями интерме-

Результаты испытаний на теплостойкость

Исследуемые материалы	Средние значения твердости металла перед испытанием, HV	Средние значения твердости металла HV после отпуска при температуре, °С			
		400	500	600	700
45ХНМ	567	486	461	334	317
Endotec DO*04	528	510	495	425	338
ПП-25Х15МГСФР с карбидом бора	618	603	585	535	469
Исследуемые материалы	Степень разупрочнения				
	$\frac{HV\ 400\ ^\circ C}{HV_{исх}^*}$	$\frac{HV\ 500\ ^\circ C}{HV_{исх}^*}$	$\frac{HV\ 600\ ^\circ C}{HV_{исх}^*}$	$\frac{HV\ 700\ ^\circ C}{HV_{исх}^*}$	
45ХНМ	0,86	0,81	0,59	0,56	
Endotec DO*04	0,97	0,94	0,80	0,64	
ПП-25Х15МГСФР с карбидом бора	0,98	0,95	0,87	0,76	

Примечание: * — средние значения твердости металла HV перед испытанием

таллидных R-фаз типа $(Fe, Co)_{15}Cr_8Mo_{10}$ и фаз Лавеса $(Fe, Co)_2Mo$. При нагреве такого наплавленного металла свыше температур ($600\ ^\circ C$) происходит коагуляция упрочняющих интерметаллидных фаз за счет растворения более мелких частиц и стабилизация δ -феррита, что снижает теплостойкость данного металла при температурах отпуска свыше $600\ ^\circ C$. Высокие значения твердости наплавленного металла порошковой проволокой ПП-25Х15МГСФР с карбидом бора после отпуска в интервалах температур от 400 до $700\ ^\circ C$ можно объяснить тем, что в структуре данного металла присутствует карборидная эвтектика, имеющая скелетообразный характер и зернограничное расположение, а также труднорастворимые карборидные фазы, которые повышают температуру рекристаллизации и замедляют диффузионные процессы при высоких температурах, тем самым значительно повышают термостойкость [12].

Таким образом, установлено, что наплавка порошковой проволокой ПП-25Х15МГСФР с добавлением карбидов бора обеспечивает высокие показатели теплостойкости наплавленного металла в интервалах температур отпуска от 400 до $700\ ^\circ C$, стабильную структуру и твердость. Полученные технологические и эксплуатационные свойства такого металла позволяют рекомендовать его в качестве наплавочного материала для повышения стойкости инструмента горячего деформирования металла.

Библиографический список

1. Грудев, А. П. Технология прокатного производства [Текст] / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханнин. — М.: Арт-Бизнес-Центр:Металлургия, 1994. — 651 с.
2. Соколов, Г. Н. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей [Текст] / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак. — Волгоград: ВолГТУ, 2005. — 284 с.
3. Рябцев, И. А. Наплавка деталей машин и механизмов [Текст] / И. А. Рябцев. — Киев: ЕкоТехнологія, 2004. — 159 с.
4. Толстых, Л. Г. Наплавочные материалы и технология наплавки [Текст] / Л. Г. Толстых, Е. Л. Фурман. — Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2004. — 102 с.
5. Пат. 2356714 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Еремин Е. Н., Еремин А. Е., Филиппов Ю. О., Лосев А. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2007107746/02; заявл. 01.03.2007; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. — 6 с.
6. Пат. 2429957 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Лосев А. С., Еремин Е. Н., Мухин В. Ф.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2010113168/02; заявл. 05.04.2010; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27. — 5 с.
7. Пат. 2467854 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Еремин Е. Н., Лосев А. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2011137912/02; заявл. 14.09.2011; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. — 5 с.
8. Пат. 2514754 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Еремин Е. Н., Лосев А. С., Еремин А. Е., Маталасова А. Е.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2012136317/02; заявл. 22.08.2012; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13. — 10 с.
9. Еремин, Е. Н. Износостойкая наплавка ножей горячей резки металлопроката [Текст] / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, Д. Г. Покровский [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. — 2008. — № 4. — С. 17–19.

10. Еремин, Е. Н. Влияние боридных соединений на структуру и свойства мартенситно-стареющей штамповой стали, наплавленной порошковой проволокой [Текст] / Е. Н. Еремин, А. С. Лосев // Сварка и диагностика. — 2013. — № 3. — С. 32–35.

11. Еремин, Е. Н. Влияние инокулирующего модифицирования на морфологию и топографию упрочняющих фаз в жаропрочном сплаве [Текст] / Е. Н. Еремин, А. С. Лосев, Ю. О. Филиппов, А. Е. Еремин // Литейщик России. — 2008. — № 8. — С. 39–43.

12. Лосев, А. С. Исследование влияния боридов на структуру и свойства мартенситно-стареющей стали [Текст] / А. С. Лосев, Е. Н. Еремин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 1 (97). — С. 29–33.

ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения, директор машиностроительного института.

БОРОДИХИН Сергей Александрович, ассистент кафедры машиностроения и материаловедения.

ЛОСЕВ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры машиностроения и материаловедения.

Адрес для переписки: weld_techn@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.08.2015 г.

© Е. Н. Еремин, С. А. Бородихин, А. С. Лосев

УДК 621.74

**Е. Н. ЕРЕМИН
А. З. ИСАГУЛОВ
Т. В. КОВАЛЁВА**

**Омский государственный
технический университет
Карагандинский государственный
технический университет**

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ НА ОСНОВЕ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ

В статье рассматривается технология получения высокопрочных литейных форм на основе холоднотвердеющих смесей. Приведены рекомендуемые значения технологических свойств формовочных смесей, результаты исследования влияния физико-механических технологических свойств ХТС на качество литейных форм и чугунных отливок.

Ключевые слова: литье, холоднотвердеющие смеси, стержни, отливка.

Одна из главных проблем современной технологии литья — это механизация и автоматизация производства стержней и форм, трудоёмкость изготовления которых очень велика. В решении этой проблемы значительную роль играет развитие технологических процессов, основанных на использовании холоднотвердеющих смесей (ХТС). Масштабы их применения быстро растут; в настоящее время практически все крупные литейные цехи в той или иной степени используют смеси этого типа, проектирование новых цехов и центролитов также основывается на широком использовании ХТС в различных вариантах. Однако, как всякое новое направление, технология применения ХТС связана с решением ряда сложных научно-технических задач. В современном литейном цехе освоение нового типа смеси, по существу, означает перестройку всего производства — подготовка материалов, приготовление смесей, изготовление стержней и форм, выбивка и очистка отливок, обеспечение качества и т.п.

Многолетний опыт показывает, что в основе технологии изготовления формы всегда лежат физико-химические и технологические свойства связующих композиций и смесей, именно их изучение приводит к разработке принципиально новых технологических процессов.

Наибольшее практическое применение получили ХТС с синтетическими смолами.

В последние годы широко в литейных цехах применяют холоднотвердеющие смеси (ХТС) с кислотноотверждаемыми смолами. Содержание связующего в ХТС — основной показатель состава, определяющий уровень прочностных характеристик стержней и форм, качество отливок, санитарно-гигиенические характеристики процесса и его технико-экономическую эффективность.

Следует стремиться к минимальному расходу смолы с учётом достижения достаточной общей и поверхностной прочности. Минимально возможный расход связующего определяется в первую очередь качеством применяемого песка. Желатель-

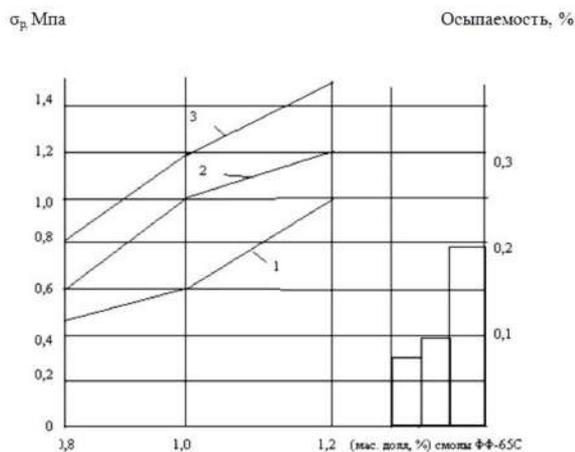


Рис. 1. Зависимость прочности при разрыве и осыпаемости (через 24 ч) ХТС от содержания смолы ФФ-65С

но применение обогащенных (мытых и классифицированных) песков с содержанием глинистой составляющей не более 0,5 % и с зернистостью не менее зернистости песка марки 1К02А. Это требование особенно актуально для высококачественных силанизированных фурановых смол (типа КФ65С, ФФ-65С), расход которых на обогащенном песке составляет 1,0...1,2 мас. ч. для стержней и 0,8...1,0 мас. ч. для облицовок крупных форм (рис. 1).

ХТС на смолах обладают высокой сыпучестью и, соответственно, малой прочностью в сыром состоянии ($\leq 0,003$ МПа при сжатии) и легко уплотняются вибрацией [1, 2].

Следует отметить, что на заводах автомобильной промышленности для чугунных отливок в основном используется карбамидфурановая смола КФ-90, а для алюминиевых сплавов и бронзы — КФ-35, КФ-40, БС-40. Стержни с рассматриваемыми связующими отверждаются в нагретом ящике до манипуляторной прочности не менее 0,2 Н/мм².

К катализаторам смол горячего отверждения следует, в первую очередь, отнести растворы нитрата или хлорида меди. В частности, на основе нитрата меди выпускаются известные катализаторы горячего отверждения КЧ-41 и КЦ-32.

В массовом и крупносерийном производстве стержней для стальных отливок используются безазотистые фенолформальдегидные смолы горячего отверждения: СФ-480 и СФЖ-305 и фенолоспирты, а также фенолфурановые смолы ФФ-65 и ФФ-64С, которые предназначены для холодного отверждения [1].

В качестве катализаторов горячего отверждения фенолоспиртов используют сильнокислые соли типа насыщенного водного раствора хлорного железа.

Газотворная способность смесей по нагреваемой оснастке, как правило, не превышает 10...12 см³/г.

Для получения толстостенных стальных отливок ответственного назначения используют ХТС с наполнителями повышенной огнеупорности и с минимальными объёмными изменениями при высокотемпературном нагреве: зернистыми концентратами циркона, хромита, дистенсиллиманита и др. При этом содержание смоляного связующего и кислотного катализатора на 100 мас. ч. наполнителя уменьшается (по сравнению с соста-

вом на кварцевом песке) $\rho_{н.п.о.} / \rho_{к.п.} ; \rho_{н.п.о.}$ и $\rho_{к.п.}$ — плотности наполнителя повышенной огнеупорности и кварцевого песка (2,655 г/см³).

Живучесть ХТС изменяется в интервале 1...2 мин (для смесей ускоренного отверждения) до 5...10 мин и зависит от расхода и концентрации кислоты и температуры внешней среды.

Скорость отверждения зависит от живучести, температуры среды и компонентов, а также заданного уровня манипуляторной прочности (для форм таковой является 0,15...0,20 МПа, для стержней 0,6...0,7 МПа при сжатии при выдержке цилиндрического образца в оснастке). Скорость отверждения регулируется от 5...6 до 30...40 мин в основном в результате изменения расхода катализатора отверждения. При отверждении прочность в первую очередь формируется во внешних слоях стержней и форм, контактирующих с воздухом. «Отставание» в формировании прочности внутренних слоёв стержня или формы является временным и нивелируется в течение 1,5–2 часов.

В состав ХТС обычно входят кварцевый песок, смола, кристаллизатор отверждения смолы. Формовочные смеси с фуриленоформальдегидной смолой (ФФ-1Ф) имели следующий состав: сухой кварцевый песок 100 % (должен содержать не более 0,5 % глины), 3 % смолы и 0,5 % катализатора к массе песка. Живучесть такой смеси 25 мин, т.е. формовка с применениями таких смесей должна быть закончена раньше этого времени [3].

$T_{сж} = 186$ кПа через 15 мин, после приготовления смеси, 686 кПа через 60 мин.

Смеси ХТС готовятся в шнековых или лопастных смесителях, которые имеют производительность до 50 т/ч смесителя устанавливаются на формовке. В смеситель вначале вводят песок, добавляют жидкий катализатор, затем вводят смолу. ХТС применяют в качестве облицовочной смеси по пенополистироловым моделям.

Широкое применение в изготовлении ХТС находят песчаные смеси на синтетических смолах холодного отверждения под действием жидких катализаторов и отвердителей.

Таким образом, по результатам исследования: определен оптимальный состав ХТС для тонкостенных отливок (состав: песок 100 %, смола 2 %, расход отвердителя 1 %, глицерин 0,03 %); определены свойства смесей с различными связующими: на синтетических смолах, фурановых смолах и с добавками окисла железа. Исследование показало, что фуриленоформальдегидная смола повышает прочность смеси на 20 %, чистоту поверхности до Rz120. При этом газопроницаемость смеси остаётся в пределах 100 единиц.

Актуальность внедрения жидкостекольных смесей обусловлена также и тем, что жидкое стекло, относящееся к числу дешевых, недефицитных и экологически чистых материалов, обеспечивает получение отливок с достаточно высокой размерной точностью. Однако, наряду с указанными преимуществами, эти смеси имеют и серьезные недостатки: затрудненную выбиваемость, высокую пригораемость, относительно низкую живучесть, повышенную гигроскопичность, плохую регенерируемость, которые в значительной степени сдерживают объемы их применения. Реализация преимуществ жидкостекольных смесей возможна в случае существенного улучшения их выбиваемости с одновременным повышением свойств регенерации отработанных смесей.

К преимуществам ХТС процесса по сравнению с процессами использования нагреваемой оснастки следует отнести следующее: повышение точности отливок на один-два класса; снижение расхода электроэнергии более чем в 10 раз; высокое качество отливок; снижение на 20–30 % потерь от брака.

Использовались различные способы уплотнения смеси, в частности применение вибрации в момент формообразования и приложение изменяющегося во времени давления. Оптимальным по результатам экспериментов определено первоначальное давление в 0,3 МПа, затем через 30 сек следует повышение давления до 0,35 МПа. Все это способствует повышению прочности смеси на 30–40 %. В производстве крупных стальных и чугунных отливок использование ХТС позволяет резко сократить технологический цикл за счёт ликвидации объёмной или поверхностной сушки форм, повысить производительность труда, уменьшить стоимость оборудования путём замены комбинированных методов уплотнения виброуплотнением.

Предложен новый состав ХТС для стержней (0,001 % сульфакислоты, кварцевый песок 100 %, 3 % фуриленоформальдегидная смола, 0,5 % катализатора к массе песка) [4].

Такие высокопрочные литейные формы позволяют получать отливки с высокой чистотой поверхности (Rz 90...120) и геометрической точностью размеров ($\pm 0,005$ %). Проведены в производственных условиях исследования влияния физико-механических технологических свойств ХТС на качество литейных форм и чугунных отливок.

Реализация технологии приведёт к технологическому перевооружению литейных цехов с последующим переходом к производству качественных отливок для машиностроительных и иных предприятий и организаций, в частности, радиаторов для реализации жилищной программы и отливок деталей железнодорожных вагонов для АО «Темір Жолы». Также технология изготовления литейных

форм актуальна для горнодобывающей отрасли, потребляющей ежемесячно большое количество отливок в виде постоянно изнашивающихся зубьев экскаваторов, траков гусениц, других запасных частей, мелющих тел для рудообработки и т.д.

Библиографический список

1. Повышение эффективности технологии литья в оболочковые формы / В. С. Серебро [и др.] // Литейное производство. — 1991. — № 9. — С. 17–19.
2. Руденко, А. Б. Литьё в облицованный кокиль // А. Б. Руденко, В. С. Серебро. — М.: Машиностроение, 1987. — 184 с.
3. Литейные связующие в массовом производстве: каталог. — Свердловск: ВНИИОТ, 1987. — 34 с.
4. Пат. 28682 РК, МКИ В22С 1/20. Состав холоднотвердеющей смеси / Исагулов А. З., Куликов В. Ю., Ковалёва Т. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Исагулов А. З. — № 2013/135.1; заявл. 28.08.2013; опубл. 15.07.2014, Бюл. № 7. — 2 с.

ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), директор машиностроительного института, заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: weld_techn@mail.ru

ИСАГУЛОВ Аристотель Зейнуллинович, доктор технических наук, профессор НА ККСОН (Республика Казахстан), первый проректор Карагандинского государственного технического университета.

Адрес для переписки: mlpikm@mail.ru

КОВАЛЁВА Татьяна Викторовна, преподаватель кафедры «Нанотехнологии и металлургия» Карагандинского государственного технического университета.

Адрес для переписки: sagilit@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.09.2015 г.

© Е. Н. Еремин, А. З. Исагулов, Т. В. Ковалёва

Книжная полка

621.45/E78

Ерохин, Б. Т. Теория и проектирование ракетных двигателей / Б. Т. Ерохин. — СПб.: Лань, 2015. — 596 с.

В учебнике изложено физико-математические описания процессов: воспламенения, тепломассообмена, нестационарного, турбулентного и неустойчивого горения топлив; газотермодинамики гетерогенных и гомогенных продуктов горения; методов математического моделирования энергетических характеристик и параметров рабочего процесса для нестационарных и квазистационарных режимов функционирования ракетных двигателей различного назначения. Приведены методы расчета потерь удельного импульса тяги, разбросов основных параметров рабочего процесса и способы выбора системы управления вектором тяги летательного аппарата. Представлены математические модели и методы расчета проектных и газодинамических параметров ракетно-прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Основное внимание в учебнике уделено фундаментальным вопросам теории рабочих процессов и созданию более строгих физико-математических моделей процессов и явлений, ориентированных на использование современных вычислительных средств.

Учебник предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов соответствующих специальностей, также может быть полезным для научных и инженерно-технических работников предприятий и организаций оборонно-космического и авиационного комплекса.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕСЧАНО-СМОЛЯНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ СТАТИЧЕСКОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В статье выведены уравнения напряженно-деформированного состояния смеси. Приведены результаты исследования целесообразности некоторого увеличения давления на смесь в процессе формообразования, зависимости прочности на разрыв и изгиб от прилагаемого статического давления на смесь во время формообразования оболочки, зависимости шероховатости формы от изменения давления в процессе формирования оболочки.

Ключевые слова: формообразование оболочки, формовочная смесь, отливка.

В природе, технике, в том числе и в производстве новых материалов, часто встречаются дисперсные системы, в которых одно вещество равномерно распределено в виде частиц внутри другого вещества. Это относится, в том числе, к процессу таблетирования при производстве полимеров, изготовлении твердосплавных напаяек для режущего инструмента, к шихтовым материалам, брикетам, получаемым в металлургической практике, и некоторым другим смесям, широко используемым в производстве новых и традиционных материалов. Все это в полной мере относится и к формовочным материалам, используемым в металлургическом и литейном производстве.

Применение компьютерных технологий и моделирования позволяет сделать расчеты параметров машин и оборудования и технологических процессов производства значительно более производительным и точно, что существенно повышает качество разработок промышленной техники и технологии. Все это в конечном итоге сказывается на жизнедеятельности общества. Необходимо иметь в виду, что эффективное воздействие на организацию качественной бесперебойной продукции достигается только при правильном выборе технологических процессов, соответствующем техническом оснащении производственных, в том числе и литейных цехов, возможности заранее предусмотреть, как отразятся на заготовках и готовых изделиях те или иные факторы. Все это можно достигнуть путем глобальной информатизации и переоборудования в производственных цехах.

Известно, что от структуры тела зависят его свойства. Одной из важных задач, стоящих перед наукой и практикой, является повышение производительности изготовления изделий из дисперсных материалов за счет модернизации существующего оборудования и внедрения новых технологических процессов.

Построение математических моделей процессов уплотнения для описания напряженно-деформированного состояния проводится в целях выбора рациональных схем и режимов уплотнения, позволяет управлять структурой изделий. Вследствие этого появляется возможность регулирования свойств изделий, таких как плотность, прочность, газопроницаемость, шероховатость. Внедрение инновационных устройств и способов изготовления прессованных изделий позволит повысить производительность, качество изготавливаемой продукции, то есть приведет к снижению себестоимости продукции, а значит, сделает ее конкурентоспособной на рынке товаров.

Управление свойствами дисперсных материалов осуществляется через построение математических моделей и тем самым осуществляется прогнозирование технологических параметров для обеспечения заданных характеристик.

В частности, одним из важных технологических свойств дисперсных смесей является газопроницаемость, то есть их способность пропускать газы. Возникает необходимость определить зависимость газопроницаемости от условий прессования.

При статическом прессовании на дисперсную смесь действует давление прессовой колодки и давление воздуха в слое [1].

Давление прессовой колодки определяется по зависимости (1):

$$P_k = \xi \cdot f \cdot \sigma_0 \cdot z \cdot \frac{P}{F_{mat}}, \quad (1)$$

где ξ — коэффициент бокового давления; f — коэффициент внешнего трения; σ_0 — давление прессовой колодки на границе с дисперсной смесью; P — периметр матрицы; F_{mat} — площадь матрицы, z — текущая координата рассматриваемого слоя смеси по высоте.

Давление от воздуха в слое смеси будет определяться по зависимости (2)

$$p_B = (n - 1) \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \cdot z, \quad (2)$$

где n — пористость смеси; p — давление воздуха в элементарном слое смеси.

В [2] определена зависимость давления P от плотности и массы смеси:

$$P = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left\{ \frac{\alpha}{k_0} \left[\rho_{np} - \frac{m}{F_{np} \cdot (H - L)} \right] \right\},$$

где α — коэффициент потери сжимаемости; k_0 — начальное значение коэффициента прессования; ρ_{np} — предельная плотность сплошного тела; m — масса смеси; F — площадь прессовой колодки; H — высота заполнения матрицы; L — расстояние, пройденное поршнем при прессовании.

Давление на смесь будет суммой давлений от прессовой колодки и внутриспорового воздуха.

$$\begin{aligned} & \xi \cdot f \cdot \sigma_0 \cdot z \cdot \frac{\Pi}{F_{mat}} + (n - 1) \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \cdot z = \\ & = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left\{ \frac{\alpha}{k_0} \left[\rho_{np} - \frac{m}{F_{np} \cdot (H - L)} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Газопроницаемость связана с пористостью следующей зависимостью [3]:

$$\Gamma = d^2 \cdot \frac{S^2}{96 \cdot (1 - n) \cdot \eta}, \quad (4)$$

где d — диаметр зерна; S — площадь просвета между частицами смеси; η — динамическая вязкость газа.

Таким образом, подставляя (4) в (3), можно выразить значение газопроницаемости.

$$\Gamma = \frac{d^2 \cdot S^2 \cdot \frac{\partial p}{\partial y}}{\left[-\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left\{ \frac{\alpha}{k_0} \left[\rho_{np} - \frac{m}{F_{np} \cdot (H - L)} \right] \right\} - \xi \cdot f \cdot \sigma_0 \cdot z \cdot \frac{\Pi}{F_{mat}} \right]} \cdot 96 \cdot \eta$$

Средний диаметр зерен определяется их фракцией. Очевидно, что площадь просвета между частицами будет зависеть от укладки зерен и их формы.

При этом элементарное внутриспоровое давление можно определить по (5) [4]

$$\partial p = \frac{1}{1 + B_3 \frac{N_a V_0}{P_0}} \left\{ \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2\sigma_3) + \frac{\sqrt{2}K}{3\mu^2} (\sigma_1 - \sigma_3) \right\}; \quad (5)$$

где p_0 — начальное значение порового давления, обычно до приложения механической нагрузки, равное атмосферному; N_a — начальный объем воздуха в порах в единице объема смеси; B_3 — коэффициент, зависящий от фракции и формы песка; V — коэффициент изменения объема; μ — коэффициент Пуассона смеси; K — коэффициент пропорциональности.

Определено напряжение релаксации σ_p песчано-смоляной смеси:

$$\sigma_p = \frac{E_0 \cdot E_1 \cdot \varepsilon_p}{2 \cdot (E_0 + E_1)},$$

где E_0, E_1 — соответственно модуль упругости в момент времени $t=0$ и $t=t_1$;

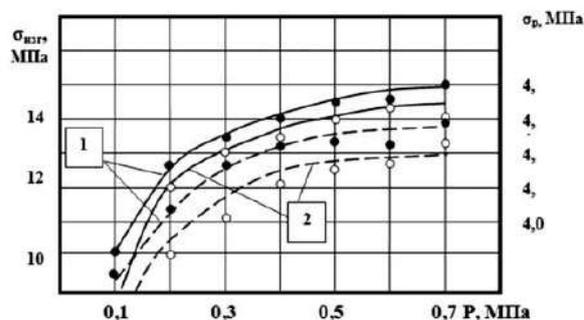
ε_p — деформация релаксации.

Зависимость (6) есть уравнение ползучести песчано-смоляной смеси при приложенной статической нагрузке на смесь.

$$\varepsilon = \sigma \cdot \left[\frac{2 \cdot \tau_1}{E_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \right], \quad (6)$$

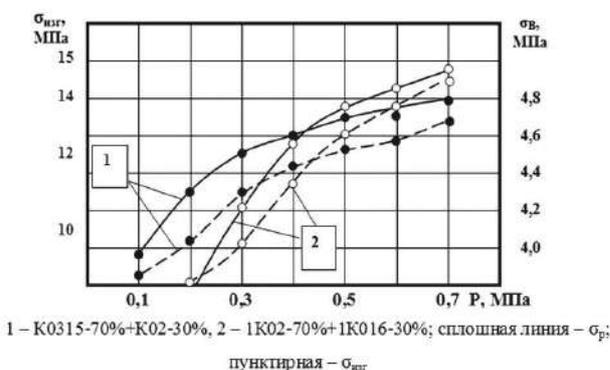
где τ_1 — период ползучести в момент времени $t=t_1$.

Экспериментально исследовались зависимости прочности на разрыв и изгиб от прилагаемого статического давления на смесь в время формообразования оболочки. Давление через прессовую плиту осуществлялось сжатым воздухом из пневмопровода. График зависимости прочности на разрыв и изгиб от прилагаемого статического давления на смесь приведен на рис. 1, 2. Экспериментально определено, что приложение давления на смесь повышает прочность. С повышением давления после 0,2–0,25 МПа прочность увеличивается, но интенсивность повышения прочности падает по мере повышения давления. Таким образом, оптимальным давлением при формообразовании оболочек для отливок отопительного оборудования следует признать 0,18–0,25 МПа.



1 — K02-100%, — K016-100%; сплошная линия — σ_p ; пунктирная — $\sigma_{изг}$

Рис. 1. Зависимость прочности на разрыв и изгиб от прилагаемого статического давления на смесь во время образования оболочки



1 — K0315-70%+K02-30%, 2 — K02-70%+K016-30%; сплошная линия — σ_p ; пунктирная — $\sigma_{изг}$

Рис. 2. Влияние использования песков разных фракций на прочность смеси

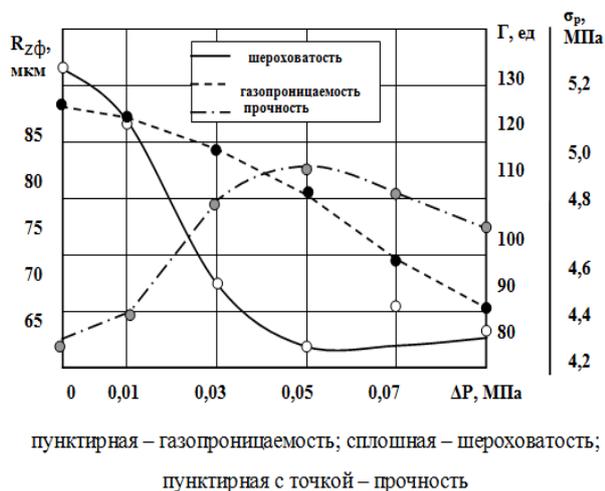


Рис. 3. Зависимость шероховатости, газопроницаемости и прочности формы от изменения давления в процессе формирования оболочки

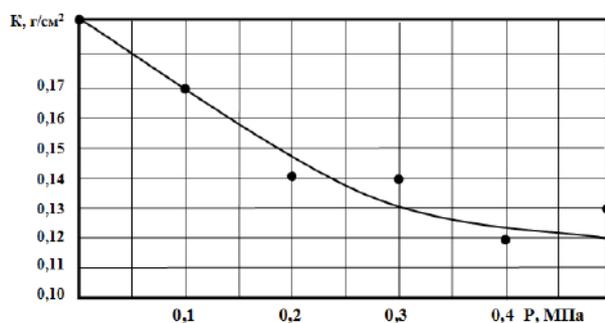


Рис. 4. Зависимость величины пригара от давления на смесь в процессе формования

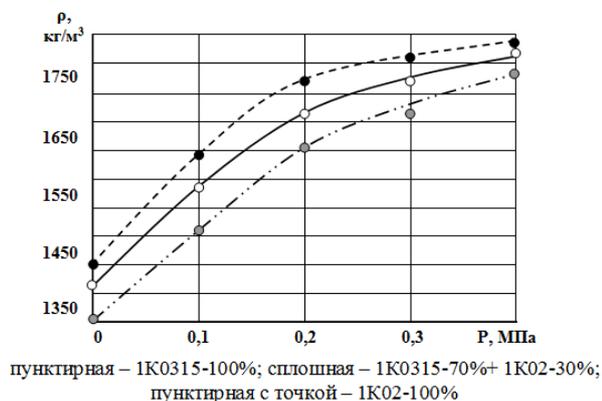


Рис. 5. Зависимость плотности смеси от величины прилагаемой нагрузки

Использование в смеси песков одной фракции при повышении давления приводит к параллельному повышению прочности смеси. При использовании смешанных фракций вначале большую прочность имеют пески с более крупной фракцией, при использовании давления свыше 0,45 МПа несколько большую прочность как на разрыв, так и на изгиб имеют смеси с наполнителем меньших фракций. Это связано с более полным удалением внутрипорового воздуха и тем, что пески меньших

фракции более плотно («монокристичнее») прилегают друг к другу при данном давлении, придавая смеси большую прочность.

Также исследовалось влияние целесообразности некоторого увеличения давления на смесь в процессе формования. Определено, что при увеличении давления на 0,03–0,05 МПа снижается шероховатость оболочковых форм, не снижая при этом технологически необходимой величины газопроницаемости. При дальнейшем увеличении давления наблюдается снижение газопроницаемости менее 100 ед. и некоторое увеличение шероховатости, что обусловлено выдавливанием зерен в уже образующейся оболочке. Прочностные свойства также ухудшаются вследствие выгорания связующего при более интенсивном прогреве ПСС.

График зависимости шероховатости формы от изменения давления в процессе формирования оболочки приведен на рис. 3. Начальное давление во всех случаях составляло 0,2 МПа. Время выдержки оболочки на плите — 30 с при температуре 250 °С. Спекание оболочки происходило в электропечи при температуре 350 °С в течение 180 с. Наполнитель — песок фракций в соотношении 1K0315-70 % и 1K02-30 %. Связующее — пульвербакелит — 5 %.

Доля оценки пригара после охлаждения отливки из них дисковой фрезой вырезали образцы размером 30×30×15 мм. Плоскость образцов зачищалась от легко отделяемого пригара формовочной смеси. Оставшийся пригар (трудно отделяемый) удалялся в расплаве едкого натра при температуре 500 °С в течение 4...6 часов (по достижению постоянного веса образца). За количественную характеристику пригара принималось отношение веса пригара к площади поверхности образца (г/см²). Результаты экспериментальных данных по изучению зависимости величины пригара от давления на смесь приведены на графике (рис. 4). Как видно из графика, приложение нагрузки во время образования оболочковой формы значительно влияет на величину пригара в сторону его снижения. Давление 0,18...0,25 МПа, определенное как оптимальное для получения форм радиаторов, можно признать весьма удовлетворительным и для величины пригара. По мере увеличения давления уменьшается скорость снижения пригара на отливках.

Зависимость плотности от величины прилагаемой нагрузки во время формования оболочки по результатам экспериментальных исследований представлены на рис. 5. При проведении экспериментов использовались смеси с различными фракциями песка в качестве наполнителя. Как показали эксперименты, с повышением величины давления плотность дисперсной песчано-смоляной смеси повышается по закону, близкому к параболическому. Разница в начальной насыпной плотности смеси сохраняется примерно при любом давлении.

Таким образом, найдено, что оптимальным для получения плотной и прочной оболочки является давление на смесь, состоящее из основной и дополнительной нагрузки. Основная нагрузка на смесь находится в пределах 0,18...0,22 МПа. Увеличение нагрузки в процессе формирования оболочки до 0,22...0,30 МПа повышает прочность на разрыв песчано-смоляной формы на 0,3...0,4 МПа [5]. Полученные математические зависимости формования дисперсных смесей можно использовать в производстве новых материалов, в частности полимерных изделий, твердосплавных материалов методами порошковой металлургии и других.

1. Матвеевко, И. В. Динамические и импульсные процессы и машины для уплотнения литейных форм / И. В. Матвеевко, А. З. Исагулов, А. А. Дайкер. — Алматы : Гылым (Наука), 1998. — 345 с.
2. Максимов, Е. В. Механизм уплотнения слоя дисперсных частиц и особенности взаимодействия теплоносителя с ними / Е. В. Максимов, А. З. Исагулов, В. Ю. Куликов // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию Е. А. Букедова, 23–24 марта 2005 г. — Караганда, 2005. — С. 422–429.
3. Гуляев, Б. Б. Формовочные процессы / Б. Б. Гуляев, О. А. Корнюшкин, А. В. Кузин. — Л. : Машиностроение, 1987. — 264 с.
4. Исагулов, А. З. Влияние внутрипорового воздуха на напряжённое состояние дисперсной среды при статической нагрузке / А. З. Исагулов, В. П. Малышев, В. Ю. Куликов // Труды университета. Карагандинский гос. техн. ун-т. — 2004. — № 3. — С. 34–36.
5. Исследование технологических характеристик дисперсных формовочных материалов / В. Ю. Куликов, Св. С. Квон, Е. П. Щербачева, Т. В. Ковалёва // Mokslas Lietuvos Ateitis. — 2014. — № 6. — С. 640–642.

ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), директор машиностроительного института, заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: weld_techn@mail.ru.

КУЛИКОВ Виталий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент НА ККСОН (Республика Казахстан), заведующий кафедрой нанотехнологий и металлургии Карагандинского государственного технического университета.

Адрес для переписки: mlpikm@mail.ru.

КОВАЛЁВА Татьяна Викторовна, преподаватель кафедры нанотехнологий и металлургии Карагандинского государственного технического университета.

Адрес для переписки: sagilit@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.09.2015 г.

© Е. Н. Еремин, В. Ю. Куликов, Т. В. Ковалёва

УДК 621.791.92.042

**Е. Н. ЕРЕМИН
Т. А. ШЕВЕЛЕВА
Ю. О. ФИЛИППОВ
А. С. ЛОСЕВ
С. А. БОРОДИХИН
А. Е. МАТАЛАСОВА**

Омский государственный
технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛА ЗУБЬЕВ ВЕНЦОВ, НАПЛАВЛЕННЫХ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ПП-АН170

Приведены результаты исследования структуры и твердости наплавленного металла зубьев венцов при использовании полуавтоматической наплавки порошковой проволокой ПП-АН170 в сравнении с электродами Т-620. Предложены параметры режима термической обработки наплавленного металла. Показано, что структура наплавленного металла состоит из карбидных выделений, равномерно распределенных в мартенситной матрице с твердостью выше 60 HRC, что обеспечивает его повышенную износостойкость.

Ключевые слова: наплавка, зубья, порошковая проволока, твердость, структура, износостойкость.

В процессе эксплуатации детали ходовой части гусеничных машин работают в сложных условиях циклических нагрузок в окружении абразива, подвергаясь значительному износу.

Наиболее изнашивающейся деталью, определяющей работоспособность гусеничного тягача, является ведущее колесо. Ведущее колесо выполняется

из ступицы и зубчатых венцов. Основную нагрузку от гусеницы воспринимают зубья венца. Именно они определяют износостойкость ведущего колеса в целом.

Для изготовления зубчатых венцов используется сталь 35ХН2МЛ, химический состав которой по ТУ-24-1-12-181-75 приведен в табл. 1.

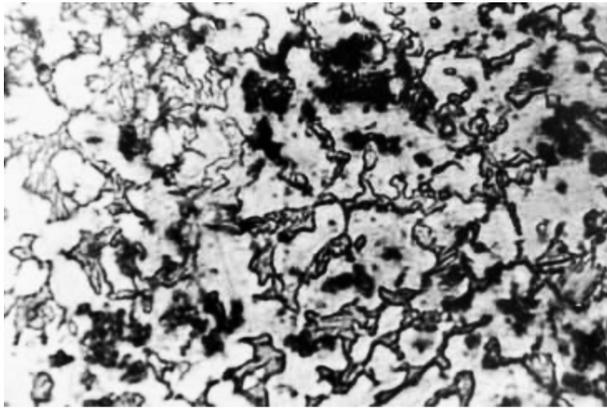
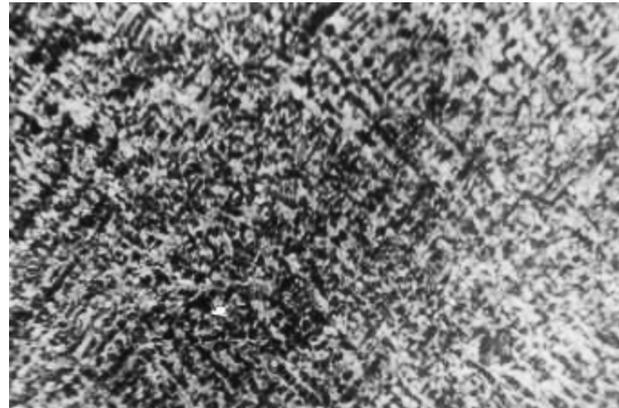
Химический состав стали 35ХН2МЛ, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,30–0,40	0,25–0,45	0,60–0,90	0,50–0,80	1,30–1,70	0,20–0,30

Таблица 2

Химический состав наплавленного металла, %

Металл	C	Cr	B	Ti	S	Mn
Требования ТУ	0,5–0,9	18–23	2,7–3,6	0,1–0,5	<1,0	<1,0
После наплавки	0,79	19,05	3,2	0,3	0,6	0,9

Рис. 1. Микроструктура наплавленного металла, $\times 320$ Рис. 2. Структура поверхностной зоны наплавленного металла, $\times 150$

Твердость стали после закалки (охлаждение в водном растворе глицерина) и низкого отпуска составляет 40–56 HRC, что не обеспечивает высокой износостойкости зубьев. Замена этих деталей при ремонте требует больших капиталовложений.

Одним из способов повышения ресурса деталей является их наплавка износостойкими материалами [1–5]. Для упрочнения таких деталей рекомендуется ручная дуговая наплавка электродами Т-620 (ЭН — У30Х23РС2ТГ) [6]. Производительность при этом низкая — до 1,5 кг наплавленного металла в час.

Более приемлемой представляется технология механизированной наплавки самозащитной порошковой проволокой ПП-АН170 (70Х20Р3Т) с колебанием электрода на всю ширину зуба [7]. В то же время структура и свойства металла, наплавленного этой проволокой, изучены недостаточно, что и послужило целью выполнения данной работы.

Наплавка осуществлялась полуавтоматом А-765. При наплавке варьировался ток, напряжение, расстояние от электрода до изделия. Установлено, что устойчивое горение дуги и хорошее формирование наплавленного металла имеет место при токе 300–340 А, напряжение 32–34 В, скорость подачи проволоки 80 м/час, скорость наплавки 18 м/час. Производительность наплавки составила 3,5–5 кг/час.

Наплавка зуба венца при требуемой толщине слоя не менее 7 мм может осуществляться за 1 или 2 слоя. При разработке схемы наплавки было опробовано несколько вариантов ведения электрода.

Наилучшие результаты получены при двухслойной наплавке.

В табл. 2 приведен химический состав металла, наплавленного порошковой проволокой марки ПП-АН170 согласно ТУ и по опытным данным.

Оптимальная износостойкость наплавленного металла обеспечивается количеством и формой карбидов в эвтектике, их твердостью, а также твердостью основной матрицы.

Микроструктура наплавленного металла при наплавке как в один, так и в два слоя, идентична и состоит из карбидных выделений, эвтектики и α -твердого раствора (рис. 1).

В поверхностной зоне наплавки образуется, по видимому, скрыто игольчатый мартенсит $H_{\mu} = 780$, δ -феррит, троостит и карбидная фаза (рис. 2).

Для зоны наплавки характерна структурная неоднородность в зависимости от места расположения исследуемого участка по отношению к границе сплавления. В результате самоотпуска в областях, расположенных вблизи границы сплавления, выявляются феррито-цементитные структуры разной дисперсности.

В металле наплавки присутствуют сложнелегированные карбиды типа: $(Cr,Fe)_{23}C_6$, Me_7C_3 , MeC . Возможно наличие карбонитридов и интерметаллидов типа фаз Лавеса (Fe_2Me).

Эта структура значительно отличается от структуры наплавки электродами Т-620 составом, формой, размерами и количеством карбидной фазы, а также матрицей (у наплавки электродом Т-620 матрица ледебуритная).

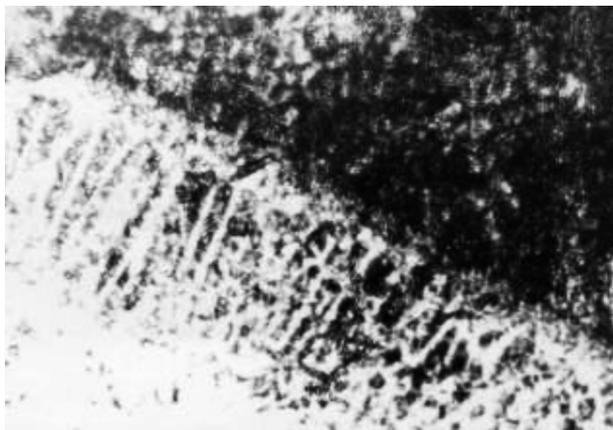
Рис. 3. Граница сплавления после наплавки, $\times 320$ Рис. 4. Микроструктура наплавленного металла после высокого отпуска, $\times 320$

Таблица 3

Твердость наплавленного металла после отпуска (HRC)

№	Вид термообработки	ПП-АН170		Т-620
		1 слой	2 слой	
1	Без термообработки	66	64	$\geq 62,0$
2	Отпуск 250 °С	62	61	
3	Отпуск 400 °С	61	60	
4	Отпуск 500 °С	64	65	
5	Отпуск 550 °С	66	67	
6	Отпуск 600 °С	62	61	

Микроструктура в зоне термического влияния (ЗТВ) у линии сплавления состоит из среднеиглочатого мартенсита (рис. 3). В структуре хорошо видны дендриты, направленные перпендикулярно к линии сплавления, что указывает на наличие градиента температуры в процессе охлаждения детали в указанном направлении.

Вдали от линии сплавления микроструктура представляет собой сорбит с мелкими выделениями феррита. Структура ЗТВ — троостомартенсит. Глубина и твердость этой зоны зависит от параметров термического цикла. При оптимальном термическом цикле глубина ЗТВ составляет около 6 мм.

Мартенсит, образующийся в ЗТВ, увеличивает хрупкость наплавленных деталей, снижая их прочность. Устранить эту хрупкость можно за счет отпуска, при котором происходит распад мартенсита и превращение его в более пластичную фазу. В связи с этим, было необходимо изучить, как влияет режим отпуска (время выдержки и температура нагрева) на структуру и твердость основного и наплавленного металла. Результаты исследований показали, что распад мартенсита начинается при 250 °С, а при температуре выше 600 °С твердость наплавленного металла снижается. При исследовании микроструктуры металла наплавленных образцов установлено, что распад мартенсита по всей глубине ЗТВ достигается при нагреве этих деталей в течение 2 ч. Поэтому исследовали влияние на твердость наплавленного металла следующих параметров режима отпуска: время выдержки 2 ч, интервал температур нагрева 250 °С, 400 °С, 500 °С, 550 °С, 600 °С.

Измерения проводились на темплетях на расстоянии 3 мм от поверхности наплавки (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что при повышении температуры отпуска до 400 °С твердость наплавленного металла плавно уменьшается, при 500–550 °С резко возрастает и достигает максимальных значений, а затем при 600 °С резко снижается. Помимо твердости наплавленного металла измеряли микротвердость матрицы и карбидов (при нагрузке 0,5 Н). Твердости карбидов равна ~ 1400 ед. при всех температурах отпуска. Изменение микротвердости матрицы в зависимости от температуры отпуска аналогично изменению твердости наплавленного слоя. Из этого следует, что характер изменения твердости наплавленного металла определяется твердостью матрицы.

Была изучена микроструктура наплавленного металла после высокого отпуска (рис. 4). В зоне наплавки обнаруживается феррито-цементитная смесь разной дисперсности (троостит, сорбит) и карбиды. Для структуры данного образца после высокого отпуска в отличие от структуры образца после наплавки, характерна более однородная микроструктура и отсутствие грубых структурных образований. На свойства отпущенной стали большое влияние оказывает карбидная фаза. Наличие в ней карбидообразующих элементов способствует сложному перераспределению углерода в твердом растворе стали с повышением температуры отпуска. Наблюдается их коагуляция. Вероятно, часть сложного легированных карбидов может диссоциировать: $Me_3C \rightarrow Me_2C$, $Me_{23}C_6 \rightarrow Me_6C$ и т.д. [8]. Наличие таких дисперсных фаз упрочняет наплавленный слой, несмотря на общие процессы разупрочнения, идущие при высоком отпуске [9].

Измерение твердости исходной стали после наплавки и после высокого отпуска показало, что значения твердости в обоих случаях примерно одинаковы и составляет 50–55 HRC.

Вероятно, наличие высокой твердости в первом случае обусловлено структурой, полученной в процессе закалки при наплавке на воздухе. В образцах стали после отпуска высокие значения твердости обусловлены процессом вторичного твердения.

По-видимому, в определенном интервале температур отпуска реализуется явление дисперсионного твердения матрицы в результате частичного распада твердого раствора и выделения дисперсных частиц — карбидов [10].

Однако, как уже отмечалось, прочность деталей определяется пластическими свойствами металла ЗТВ. Поэтому, одновременно с исследованиями

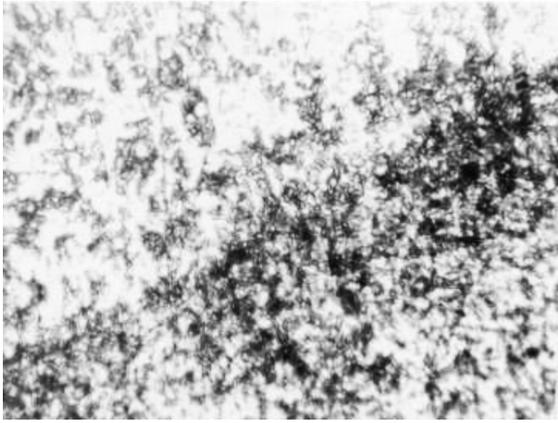


Рис. 5. Граница сплавления после высокого отпуска, $\times 320$

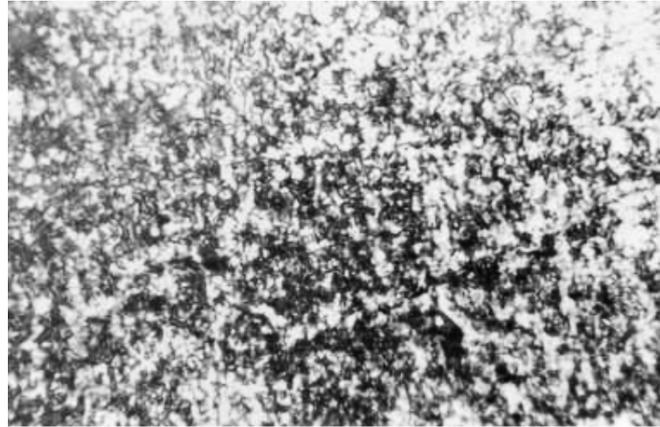


Рис. 6. Микроструктура стали 35ХН2МЛ после высокого отпуска, $\times 320$

изменения зависимости твердости наплавленного металла от температуры отпуска, исследовали изменение твердости и микроструктуры металла ЗТВ. Установлено, что при $500-550\text{ }^{\circ}\text{C}$ твердость металла ЗТВ составляет НВ $280-420$, что значительно меньше твердости металла ЗТВ непосредственно после наплавки (НВ $360-480$), и примерно равна твердости троостосорбита. Это подтверждается исследованием микроструктуры металла ЗТВ, которая после такого высокого отпуска представляет собой троостосорбит.

На границе сплавления образцов после высокого отпуска грубых дендритов не наблюдается (рис. 5).

Обнаружен плавный переход из наплавленной зоны в матрицу. Матрица стали 35ХН2МЛ после высокого отпуска имеет структуру сорбита (рис. 6).

Твердость матрицы составляет 29 HRC. Полученные результаты свидетельствуют о том, что температура высокого отпуска $500-550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержка 2 часа оптимальны.

Результаты проведенных исследований показали, что проведение высокого отпуска может оказать положительное влияние на износостойкость металла, наплавленного проволокой ПП-АН170, как за счет получения дисперсных карбидов, более однородной структуры слоя, так и в результате «упрочнения» (устранение грубых дендритов) границы сплавления и смягчения матрицы — стали 35ХН2МЛ.

По результатам исследований предложена новая технология наплавки зубьев венцов ведущих колес гусеничных машин.

Библиографический список

1. Еремин, Е. Н. Износостойкая наплавка ножей горячей резки металлопроката [Текст] / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, Д. Г. Покровский [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. — 2008. — № 4. — С. 17–19.
2. Пат. 2356714 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Еремин Е. Н., Еремин А. Е., Филиппов Ю. О., Лосев А. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2007107746/02; заявл. 01.03.2007; опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15. — 6 с.
3. Пат. 2429957 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Лосев А. С., Еремин Е. Н., Мухин В. Ф.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2010113168/02; заявл. 05.04.2010; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27. — 5 с.

4. Пат. 2467854 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Еремин Е. Н., Лосев А. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2011137912/02; заявл. 14.09.2011; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. — 5 с.

5. Пат. 2514754 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Еремин Е. Н., Лосев А. С., Еремин А. Е., Маталасова А. Е.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2012136317/02; заявл. 22.08.2012; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13. — 10 с.

6. Рябцев, И. А. Наплавка деталей машин и механизмов [Текст] / И. А. Рябцев. — Киев: ЭкоТехнология, 2004. — 160 с.

7. Юзвенко, Ю. А. Порошковые проволоки для наплавки [Текст] / Ю. А. Юзвенко // Автоматическая сварка. — 1972. — № 5. — С. 67–71.

8. Еремин, Е. Н. Центробежное электрошлаковое литье фланцевых заготовок с применением инокулирующего модифицирования [Текст] / Е. Н. Еремин, С. Н. Жеребцов // Современная электротехнология. — 2004. — № 3. — С. 15.

9. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали [Текст] / Ю. А. Геллер. — М.: Металлургия, 1983. — 527 с.

10. Еремин, Е. Н. Влияние боридных соединений на структуру и свойства мартенситно-старееющей штамповой стали, наплавленной порошковой проволокой [Текст] / Е. Н. Еремин, А. С. Лосев // Сварка и диагностика. — 2013. — № 3. — С. 32–35.

ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), директор машиностроительного института, заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения.

ШЕВЕЛЕВА Татьяна Анатольевна, магистрант гр. СПМ-613 факультета элитного образования и магистратуры.

ФИЛИППОВ Юрий Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения и материаловедения.

ЛОСЕВ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры машиностроения и материаловедения.

БОРОДИХИН Сергей Александрович, магистрант гр. СПМ-515 факультета элитного образования и магистратуры.

МАТАЛАСОВА Арина Евгеньевна, студентка гр. С-313 машиностроительного института. Адрес для переписки: weld_techn@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.08.2015 г.

© Е. Н. Еремин, Т. А. Шевелева, Ю. О. Филиппов, А. С. Лосев, С. А. Бородихин, А. Е. Маталасова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ ФОРМОУСТОЙЧИВОСТИ (ЧАСТЬ 2)

В статье разработана методика теоретического определения рациональных режимов фрезерования никелевых сплавов. В качестве основного ограничения использовалась связь интенсивности изнашивания с температурой формоустойчивости режущего лезвия. Расчет температур выполнялся с учетом взаимосвязи температуры и характеристик сопротивления никелевых сплавов пластическим деформациям, а также с учетом влияния тепловых потоков, отводящихся из зоны резания в инструмент и в заготовку.

Ключевые слова: сплавы на никелевой основе, торцевое фрезерование, пластические деформации, температура формоустойчивости, рациональные режимы.

* Часть 1 опубликована в журнале «Омский научный вестник». – 2015. – 2 (141) – С. 31–33.

Расчет контактных температур и температуры формоустойчивости режущего лезвия. При расчете температуры передней поверхности с использованием термомеханического подхода значение предела текучести вблизи режущей кромки рассчитывалось по формуле, аналогичной (7), но с другим коэффициентом динамичности $K_q = 2,3$.

Вблизи режущей кромки (при $\varepsilon_q = 1,17$) предел текучести на сдвиг достигает $q_0 = 1,56 S_p = 2340$ МПа. Это значение принято как начальное значение предела текучести (рис. 1).

Распределение плотности теплового потока и температуры по длине пластического контакта рассчитывалось численным методом [1, с. 210; 2, с. 91–92] с учетом теплоотвода в стружку в направлении, перпендикулярном скорости резания и взаимосвязи плотности теплового потока и температуры:

$$\frac{gT}{g\tau} = \omega \frac{g^2 T}{g\tau^2} \quad \text{при } q_{ip} = \bar{q} \left(1 - \frac{\Delta T'_{i,p-1}}{1 - \frac{T_{na}}{273 + \theta_g}} \right)^{B_q} K_u. \quad (10)$$

Уменьшение плотности теплового потока вследствие разупрочнения материала учитывалось введением стокв теплоты на каждом из рассматриваемых интервалов [1, с. 186–187].

Учет плотностей тепловых потоков в стружку и деталь производился по формуле:

$$K_{un} = \left(1 - \frac{q_p}{q_{cmp}} \right) = \left(1 - \sqrt{\frac{(\lambda C_V)_p}{(\lambda C_V)_{om}}} \frac{\theta_c - \theta_0}{\theta_c - \theta_g} \sqrt{\frac{\tau_{cmp}}{\tau_p}} \right) = \left(1 - K_\varepsilon K_\theta \sqrt{\frac{\frac{c}{a} a \zeta}{\frac{D}{2} \theta_M}} \right), \quad (11)$$

$$K_{uz} = \left(1 - \frac{q_p}{q_s} \right) =$$

$$= \left(1 - \sqrt{\frac{(\lambda C_V)_p}{(\lambda C_V)_{om}}} \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_p}} \right) = \left(1 - K_\varepsilon K_\theta \sqrt{\frac{\frac{h_3}{v}}{\frac{D}{2} \theta_M}} \right), \quad (12)$$

$$\text{где } \tau_{cmp} = \frac{c}{v/\zeta} = \frac{c}{a} a \zeta = \frac{2\zeta^2 a}{v}, \quad \tau_p = \frac{D}{2} \theta_M \quad \text{и} \quad \tau_s = \frac{h_3}{v}. \quad (13)$$

При расчете температуры на задней поверхности режущего лезвия учитывалось влияние источника теплоты, расположенного на участке застойной зоны, непосредственно перед режущей кромкой [1, с. 177].

Расчет температур проводится при допущении, что при фрезеровании в любой момент времени температура передней и задней поверхностей режущего лезвия соответствует температурам этих поверхностей при точении при одинаковой толщине срезаемого слоя, соответствующей мгновенному положению зуба при фрезеровании. Для этого дуга контакта была разбита на интервалы ($i = 18$), что позволило моделировать процесс изменения температуры в зависимости от угла контакта при фрезеровании никелевых сплавов.

Выполненные по разработанной программе расчеты позволили установить, что изменение толщины срезаемого слоя при повороте зуба вызывает соответствующие изменения плотностей тепловых потоков и температур передней (рис. 2а) и задней (рис. 2б) поверхностей.

Угол контакта θ оказывает влияние на температуру передней поверхности через изме-

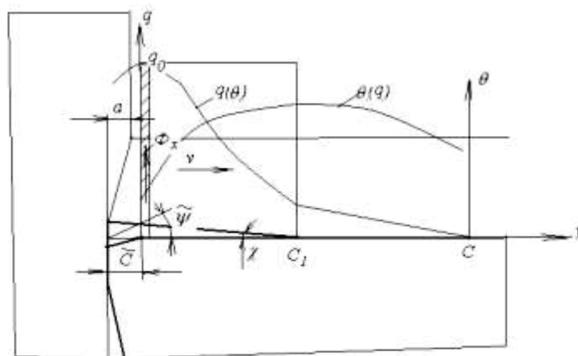


Рис. 1. Схема к расчету максимальных характеристик обрабатываемости материала резанием

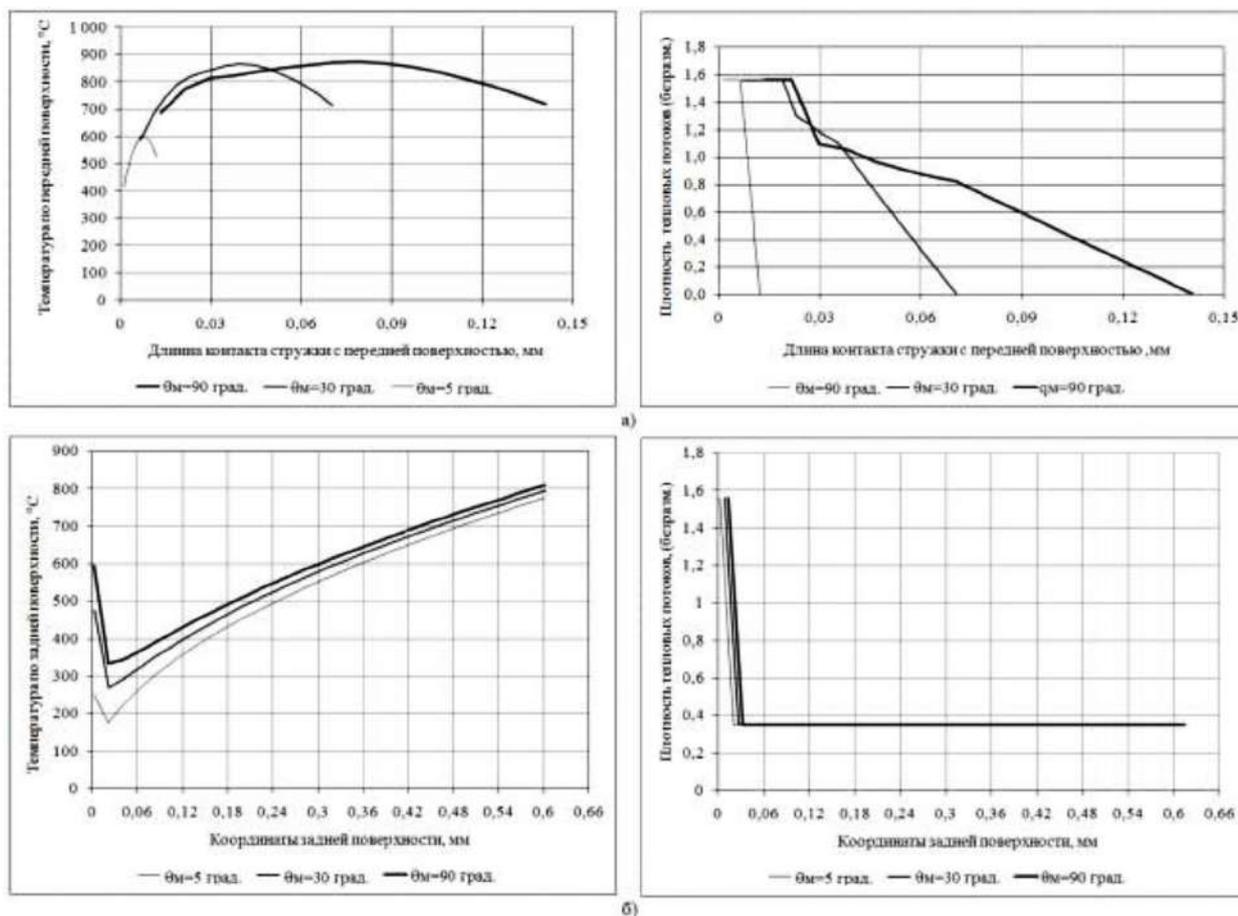


Рис. 2. Распределение плотности тепловых потоков и соответствующих им температур на передней (а) и задней (б) поверхностях инструмента при фрезеровании никелевого сплава в зависимости от угла контакта: марка сплава ХН56ВМТЮ-ВА; $\sigma_b=1250$ МПа; $\delta=0,2$; $m=0,3$; $D_f=40$ мм; $S_m=50$ мм/мин, $n=240$ об/мин, $v=30$ м/мин число зубьев фрезы $z=4$; глубина врезания зуба $e=20$ мм; глубина резания $t=1,5$ мм; передний угол $\gamma=10^\circ$ °C; угол наклона режущей кромки $\lambda=0^\circ$ °C; угол в плане $\varphi=70^\circ$ °C; радиус закругления вершины инструмента $r=0,5$ мм; критерий затупления $h_z=0,4$; усадка стружки $\zeta=1,8$

нение длины контакта стружки с режущим лезвием:

$$c \approx 2\zeta S_z \sin \varphi \sin \theta. \quad (14)$$

А на температуру задней поверхности — через высоту h_z застойной зоны, которая на первой итерации принималась равной $0,3a$ [1, с. 178] и уточнялась с учетом влияния температуры.

Температура формоустойчивости режущего лезвия рассчитывалась по формуле (рис. 3):

$$\theta_\phi = 0,7 \cdot \left[(\theta_{n,\max} - \theta_0)^2 + (\theta_{z,\max} - \theta_0)^2 \right] + 400, \\ rge \theta_0 = 400 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15)$$

Связь интенсивности изнашивания с температурой формоустойчивости режущего лезвия и рациональными параметрами фрезерования. Экспериментально полученные сведения об изнашивании твердосплавных режущих лезвий при резании сплавов на никелевой основе свидетельствовали о том, что зависимости ширины фаски износа

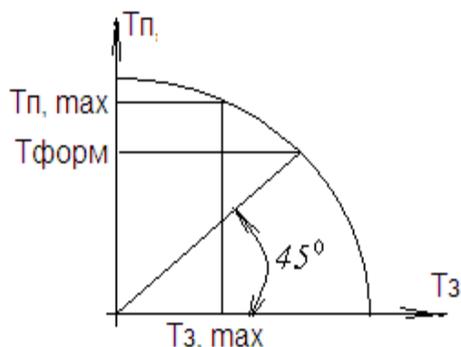


Рис. 3. Схема к определению температуры формоустойчивости режущего лезвия

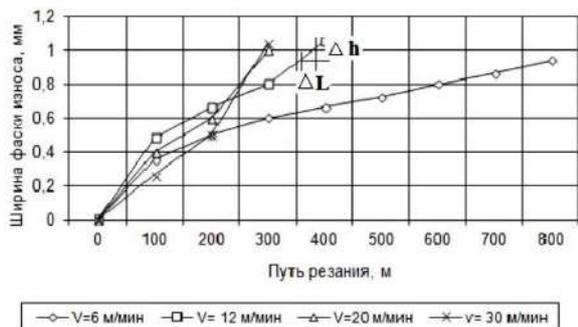


Рис. 4. Зависимости ширины фаски износа от пути резания для различных скоростей резания при точении никелевого сплава ЭП742 ВД (ХН56ВМТЮ-ВД) резцами ВК8 $\gamma=10^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $t=1$ мм, $s=0,07$ мм/об, $t=1,5$ мм

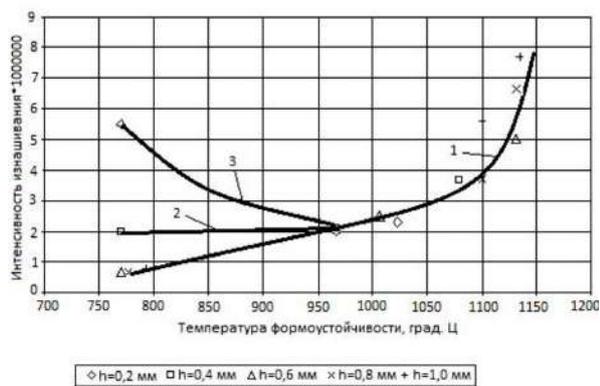


Рис. 5. Зависимость интенсивности изнашивания от температуры формоустойчивости для различных значений ширины фаски износа при резании никелевого сплава

от пути резания на порядок выше, чем при резании сталей и имеют вид нелинейных кривых, форма которых изменяется при изменении режимов резания [1, с. 261 – 264]. Это свидетельствовало о необходимости использования в качестве характеристики изнашивания инструмента интенсивности изнашивания $\delta_L = \frac{dh_s}{dL}$ [1, с. 260; 2, с. 100 – 103; 3, с. 137], а также о том, что интенсивности изнашивания в этих тяжелых термомеханических условиях резания зависят не только от изнашивания поверхностей режущего лезвия, но и от его деформации под действием

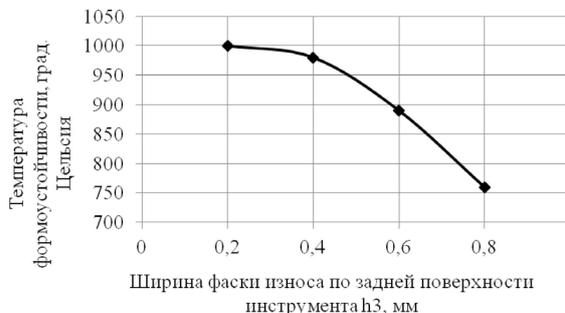


Рис. 6. Зависимость минимальной целесообразной расчетной температуры формоустойчивости режущего лезвия от критерия затупления по задней поверхности. Условия резания те же, что на рис. 4

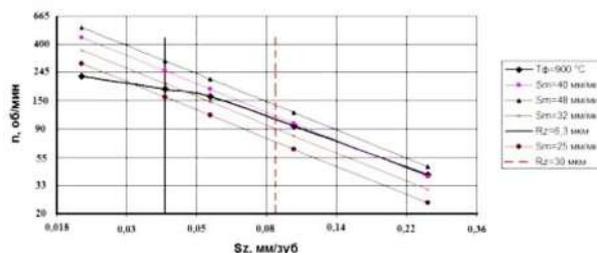


Рис. 7. Графическая интерпретация нахождения рациональных значений параметров фрезерования никелевого сплава ХН56ВМТЮ-ВД ($\sigma_b=1250$ МПа; $\delta=0,2$; $m=0,3$) при ограничениях на основе теоретических и эмпирических данных

напряжений на передней и задней поверхностях (рис. 4).

На основании рис. 6 и формулы 14 получены зависимости интенсивности изнашивания от температуры формоустойчивости для различных значений ширины фаски износа задней поверхности режущего лезвия (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что минимальная целесообразная расчетная температура формоустойчивости режущего лезвия не остается постоянной при изменении критерия затупления h^* , а уменьшается при увеличении допускаемой ширины фаски износа (рис. 6).

Для определения областей рациональных режимов фрезерования сплавов на никелевой основе нужно задать требования, в качестве одного из которых, например, может выступать требуемая площадь обработанной поверхности заготовки.

Зная среднюю интенсивность изнашивания и экспериментальные данные (рис. 4 и рис. 5) можно рассчитать температуру формоустойчивости режущего лезвия при фрезеровании никелевых сплавов и использовать ее в качестве одного из ограничений, для нахождения оптимальной подачи на зуб S_z и числа оборотов:

$$\frac{\delta^* - \delta_0}{\delta_1 - \delta_0} = \left(\frac{\theta^* - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \right)^2, \quad (16)$$

где δ^* — средняя интенсивность изнашивания, а θ^* — соответствующая ей температура формоустойчивости; δ_0 и θ_0 — минимальные целесообразные интенсивность изнашивания и температура формоустойчивости; δ_1 и θ_0 — предельно

допустимые интенсивность изнашивания и температура формоустойчивости.

Задача оптимизации решалась в два этапа:

— определялась область допустимых значений S_z и n для конкретных условий фрезерования (условия те же, что и на рис. 2) при ограничении по температуре формоустойчивости режущего лезвия, принятой для твердосплавных пластин ВК8 $\theta_{\phi} = 900^{\circ}\text{C}$;

— область допустимых значений сопоставлялась с целевой функцией S_m , имеющей с этой областью общую точку или некоторую область решений (рис. 7).

При необходимости учета ограничений по шероховатости или по износостойкости (площадь обработанной поверхности) назначается соотношение частоты вращения n и подачи на зуб S_z с учетом этих требований, за счет снижения производительности.

Заключение. Разработана схема бокового торцевого фрезерования с указанием геометрических параметров, режима фрезерования и сечения срезаемого слоя в четырех плоскостях (основной, рабочей, плоскости резания и плоскости стружкообразования).

Установлена связь характеристик износостойкости (площадь обработанной поверхности) с допускаемой средней интенсивностью изнашивания и другими характеристиками процесса фрезерования.

Выявлена зависимость удельной работы деформации A_w никелевого сплава в адиабатических условиях от деформации ϵ_p , коэффициента динамичности K_{ϵ} и температуры при фрезеровании.

Показано, что при резании сплавов на никелевой основе предел текучести обрабатываемого материала достигает значения $1,24S_b$ в зоне стружкообразования и $1,56S_b$ на передней поверхности.

Установлено, что температура деформации θ_d существенно зависит от переднего угла и достигает значения порядка 550°C при γ° , что составляет существенную часть температуры, допускаемой интенсивность изнашивания δ режущего лезвия.

Показано, что температура на участке пластического контакта стружки с режущим лезвием существенно зависит от взаимосвязи температуры и предела текучести материала.

Выявлено, что при фрезеровании никелевых сплавов тепловые потоки, отводящиеся через режущее лезвие могут составлять существенную долю от общей мощности источников тепла (до 20 %) и должны быть учтены при расчете температуры.

Библиографический список

1. Верещака, А. С. Резание материалов : учеб. / А. С. Верещака, В. С. Кушнер. — М. : Высш. шк., 2009. — 535 с.
2. Бургонова, О. Ю. Повышение эффективности обработки конструкционных материалов фрезерованием : моногр. / А. Ю. Бургонова, В. С. Кушнер. — Омск : ОмГТУ, 2013. — 140 с.
3. Крутько, А. А. Повышение эффективности восстановления токарной обработкой железнодорожных колесных пар : моногр. / А. А. Крутько, В. С. Кушнер, А. А. Воробьев. — Омск : ОмГТУ, 2013. — 176 с.
4. Режимы резания труднообрабатываемых материалов : справ. / Я. Л. Гуревич [и др.]. — М. : Машиностроение, 1986. — 240 с.
5. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. — М. : Машиностроение, 1976. — 278 с.

КУШНЕР Валерий Семенович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры машиностроения и материаловедения секции «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Адрес для переписки: valerii_kushner@mail.ru

ГУБИН Дмитрий Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры машиностроения и материаловедения секции «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Адрес для переписки: gubin.89@list.ru

Статья поступила в редакцию 03.03.2015 г.

© В. С. Кушнер, Д. С. Губин

Книжная полка

621.7/В75

Воронцов, А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие для вузов по направлению 150700 «Машиностроение». В 2 т. Т. 1 / А. Л. Воронцов. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2014. — 396 с.

В первом томе учебного пособия изложены теория процессов обработки металлов давлением и результаты теоретических и экспериментальных исследований различных операций. Приведены формулы и методы расчета основных технологических параметров с учетом исходной анизотропии свойств штампуемого материала, деформационной анизотропии, упрочнения, а также упругих деформаций формообразующего инструмента. Уточнены важные положения теории обработки металлов давлением, относящиеся к кривым упрочнения, а также к учету влияния масштаба обрабатываемой заготовки, скорости деформации и температурного эффекта. Рассмотрены теоретические методы прогнозирования разрушения заготовки и анализа распределения волокон структуры в получаемых изделиях, образования утяжин и застойных зон. Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Для студентов, обучающихся по направлению «Машиностроение», аспирантов и преподавателей, а также инженерно-технических и научных работников, специализирующихся в области обработки металлов давлением.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕМОНТА КОЛЛЕКТОРОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В статье рассматривается совершенствование технологии ремонта коллекторов тяговых электродвигателей. Для повышения качества обработки и производительности ремонта коллекторов предлагается заменить отделочные операции (шлифование и полирование) чистовым точением резцом с заточкой режущей кромки по технологии «суперлезвие».

Ключевые слова: коллекторно-щеточный узел, отделочные операции, режущий инструмент, технология заточки «суперлезвие», шероховатость.

Работоспособность и эксплуатационные качества тяговых электрических машин зависят от соответствия их параметров и конструкции условиям эксплуатации [1]. Увеличение ресурса агрегатов и узлов локомотивов требуют совершенствования технического обслуживания и ремонта. Особое место в системе ремонта занимают капитальный ремонт и часть деповского ремонта, на долю которых расходуются значительные средства. При ремонте тягового двигателя локомотива (рис. 1), кроме ремонта механической части, подвергается ремонту и электрическая часть, которая в процессе эксплуатации изнашивается, особенно в поверхностных слоях коллекторно-щеточного узла (КЩУ).

КЩУ тяговых двигателей может работать устойчиво лишь при наличии хорошего контакта электрографитизированных щеток с коллектором. Скорость скольжения электрографитизированных щеток по коллектору в эксплуатации в рабочих режимах достигает 50–55 м/с. Чем «чище» шероховатость поверхности коллектора, тем меньше будет выделяться тепла от трения электрографитизированных щеток, тем благоприятнее будут условия работы скользящего контакта и меньше износ коллектора и электрографитизированных щеток. Такой контакт может быть обеспечен только тогда, когда рабочая поверхность коллектора имеет низкую шероховатость, правильную цилиндрическую форму и концентрична с валом двигателя.

Качество обработки поверхности коллектора влияет на электрические и эксплуатационные характеристики тягового двигателя [2]. Наличие неровностей на коллекторе приводит к возникновению радиальных колебаний электрографитизированных щеток, вызывающих пульсацию контактного давле-

ния, в результате чего происходит изменение падения напряжения под электрографитизированной щеткой, и, следовательно, нарушения оптимальных условий коммутации, что вызывает искрение электрографитизированных щеток, нарушая работу скользящего контакта и приводящий к повреждению тяговых электродвигателей (ТЭД).

Критерием, характеризующим качество рабочей поверхности коллектора, является шероховатость контактной поверхности, регламентированное значение данного параметра должно составлять $Ra = 0,5$ мкм после шлифовальной операции применяемой в технологическом процессе ремонта коллекторов ТЭД.

Рабочая поверхность коллектора в эксплуатации изнашивается, и в деповской ремонт двигатель, как правило, поступает с выработкой на поверхности коллектора и повышенным биением, с подгаром пластин, «затягиванием» меди в межламельное пространство. Базовый технологический процесс ремонта коллектора включает в себя следующие виды механической обработки: продорожка межламельного пространства, обтачивание поверхностного слоя коллекторных пластин, снятие фасок, шлифование и полирование коллекторных пластин.

Для выведения следов износа и восстановления правильной геометрической формы коллектор обтачивают в условиях депо резцами, оснащенными пластинами из твердого сплава марок ВК6, ВК8 на специализированном станке (рис. 2).

Резцом с твердосплавной пластиной обрабатывают около четырех коллекторов, после чего необходимо производить переточку резца, поскольку он не обеспечивает необходимое качество обработки. Из-за конструктивной особенности коллектора



Рис. 1. Тяговый электродвигатель ТЛ-2К1



Рис. 2. Токарно-винторезный станок 1Н65

ТЭД, механическая обработка представляет собой точение прерывистой поверхности, при которой режущий инструмент испытывает ударную нагрузку. Обточка коллектора является одной из самых главных операций в технологическом процессе ремонта коллекторов. В условиях депо при выполнении этой операции возникают следующие трудности: низкая стойкость режущего инструмента и соответственно большие затраты на вспомогательные операции. В процессе обработки коллектор проходит через ряд состояний, характеризуемых параметрами качества. Каждая операция технологического процесса приводит к изменению этих параметров [3]. При обточке поверхности коллектора базовым резцом невозможно получить требуемую шероховатость поверхности коллектора. По этой причине в качестве отделочной обработки коллектора применяются операции шлифование и полирование.

Отделочные операции отрицательно сказываются на работе КЩУ, так как частицы абразивных материалов остаются в поверхностном слое меди и в дальнейшем царапают зеркальную поверхность

электрографитизированной щетки [4]. Длительное полирование приводит к возникновению завалов на краях пластин, из-за чего уменьшается площадь контакта щетки с пластиной, и ухудшаются условия коммутации.

Замена базовых отделочных операций на чистовое точение, новым режущим инструментом, позволит сократить технологический процесс ремонта ТЭД и улучшить качество поверхности.

Базовый резец с твёрдосплавной пластиной ВК8, применяемый в депо для обточки коллектора, имеет следующую геометрию, которая влияет на качество обработанной поверхности: радиус скругления режущей кромки $R_{скр} = 1,2$ мм; радиус округления кромки резца $\rho = 0,9$ мм; главный передний угол $\gamma = 10^\circ$, главный задний угол $\alpha = 7-11^\circ$; главный угол в плане $\phi = 90^\circ$. Качество лезвия режущей кромки характеризуется шероховатостью поверхности и остротой лезвия, определяемой радиусом округления ρ . Шероховатость шлифованных поверхностей режущей части лучших образцов импортного инструмента составляет

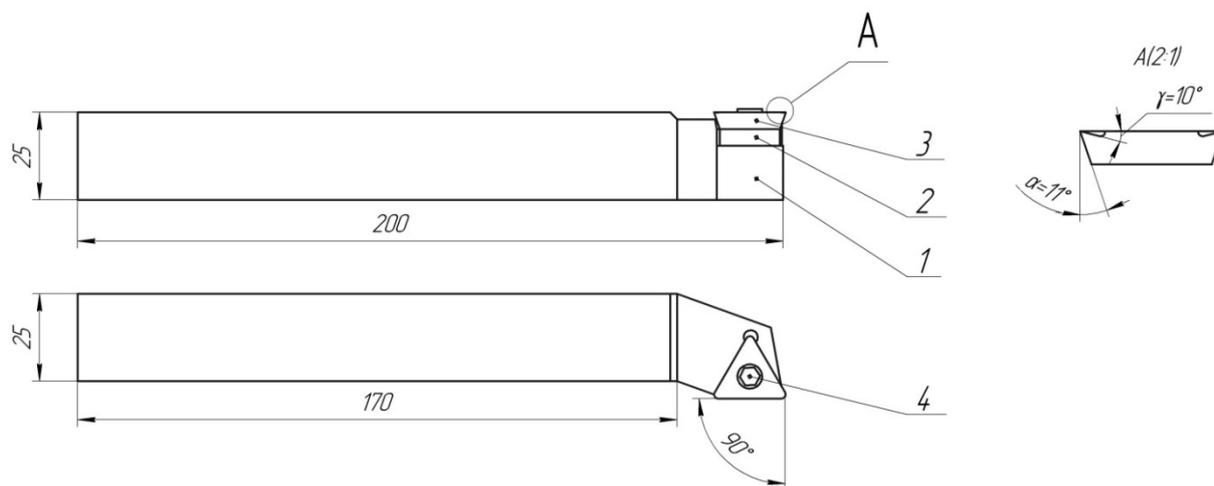


Рис. 3. Резец со сменными твердосплавными пластинами с заточкой «суперлезвие»: 1 — державка, 2 — опорная пластина, 3 — режущая пластина, 4 — крепежный винт

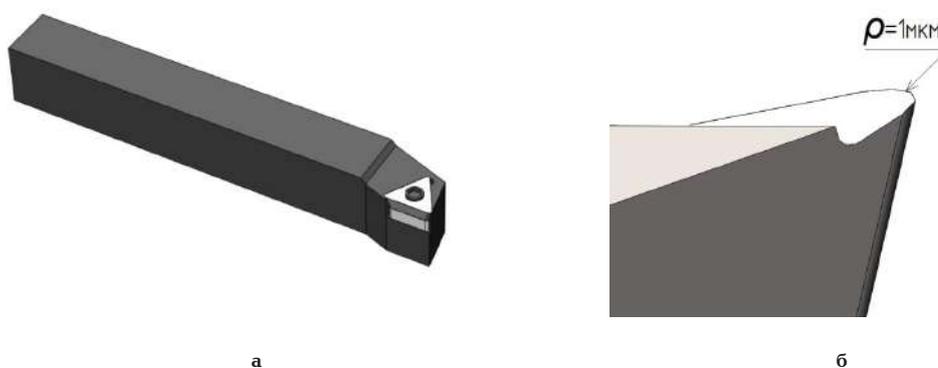


Рис. 4. Проходной упорный резец STGPL2525R22

$R_a = 0,32-0,16$ мкм, а радиус округления лезвия $\rho = 5-8$ мкм [5].

Усовершенствованный режущий инструмент для чистовой обточки коллекторов представляет собой резец со сменными твердосплавными пластинами, имеющими специальную заточку «суперлезвие» (рис. 3).

При проектировании проходного упорного резца STGPL2525R22 (рис. 4а) геометрия режущей части существенно не изменилась, за исключением радиуса скругления режущей кромки, выполненного в 1 мкм (рис. 4б).

Затачивание твердосплавного инструмента технологией «суперлезвие» производится при скорости абразивного круга $V_k = 200$ мм/мин; частота вращения $n_k = 17000$ об/мин; глубины шлифования $t = 3-5$ мкм. Выбранные режимы шлифования обеспечивают требуемую точность и качество поверхностного слоя режущего инструмента.

Экспериментальная обработка коллектора ТЭД проводится с использованием усовершенствованного резца с заточкой режущей кромки по технологии «суперлезвие». Технологические режимы резания выбираются с учетом параметров режущего инструмента и обрабатываемого материала. При чистовой обработке поверхности коллектора глубина резания $t = 0,17-0,35$ мм; частота вращения шпинделя $n = 250$ об/мин; подача $s = 0,06$ мм/об.

Расчет построения зависимости максимальной шероховатости от подачи, при различных значени-

ях радиуса скругления режущей кромки, осуществляется по формуле:

$$R_{\max} = \frac{1000S^2}{8R_{\text{скр}}},$$

где R_{\max} — максимальная шероховатость обрабатываемой поверхности, S — подача при точении, $R_{\text{скр}}$ — радиус скругления режущей кромки.

График зависимости максимальной шероховатости от подачи, радиуса скругления режущей кромки представлен на (рис. 5).

Оценка шероховатости, в первую очередь, осуществляется путем сравнения эталонов шероховатости ОШС-Т-М с полученной поверхностью после чистового точения. На (рис. 6а, б) представлены эталоны с шероховатостью $R_z = 80$ мкм и $R_a = 0,4$ мкм соответственно.

После чистовой обработки резцом, с заточкой режущей кромки по технологии «суперлезвие», шероховатость уменьшилась до $R_a = 0,2$ мкм (рис. 6в). Для уточнения значений шероховатости, измерение проводится индикаторным профилометром ПКИ-150.

Усовершенствованный резец с заточкой режущей кромки по технологии «суперлезвие» позволяет получить шероховатость при чистовом точении $R_a = 0,2$ мкм. При глубине резания, не превышающей 0,3 мм, затягивание ламелей при обработке не наблюдается, что соответствует требовани-

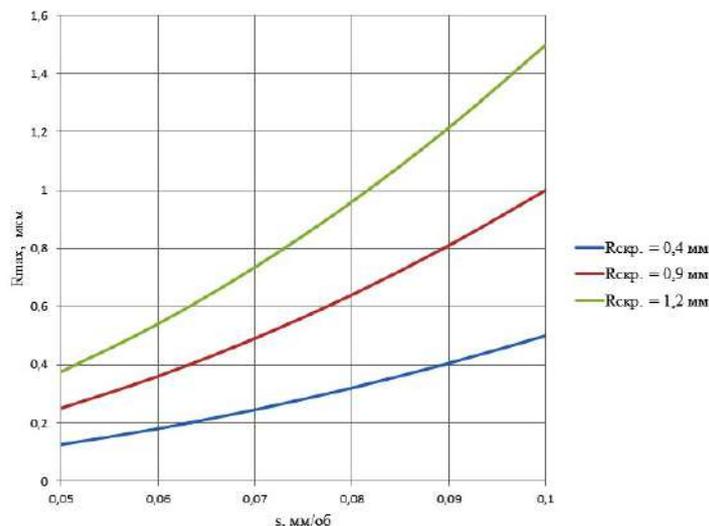


Рис. 5. График зависимости максимальной шероховатости поверхности от подачи при различных значениях радиуса скругления режущей кромки резца

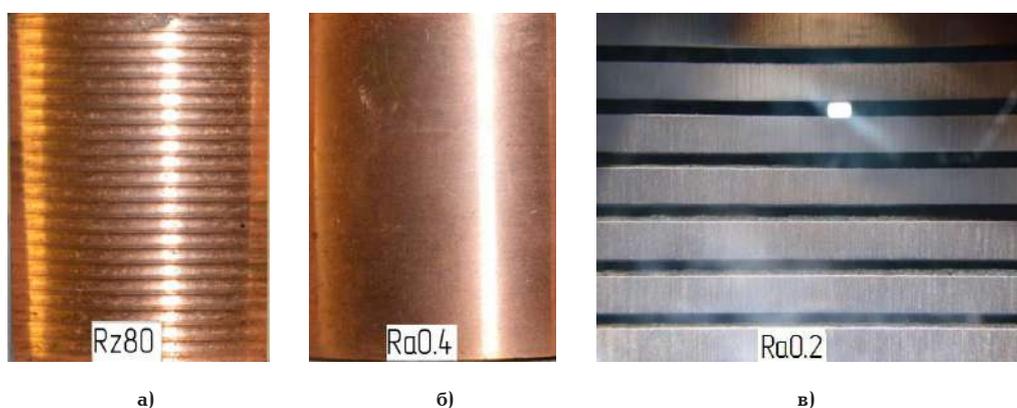


Рис. 6. Сравнение шероховатости после чистовой обточки коллектора

ям, предъявляемым к чистоте обработки рабочей поверхности коллекторов ТЭД.

Спроектированный режущий инструмент по технологии заточки «супердзвие» позволяет сократить базовые отделочные операции в технологическом процессе ремонта, что сокращает количество затрат энергоресурсов и времени на ремонт ТЭД и тем самым повышает производительность, качество его ремонта и технического обслуживания.

Библиографический список

- Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. — М. : Транспорт, 1991. — 343 с.
- Солдаткин, А. В. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электрических машин за счет совершенствования технологии ремонта коллекторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / А. В. Солдаткин. — Омск, 2013. — 22 с.
- Дуюн, Т. А. Обеспечение виброустойчивости при точении контактной поверхности коллектора электродвигателя / Т. А. Дуюн // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2009. — № 4. — С. 43–48.
- Белан, Д. Ю. Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей / Д. Ю. Бе-

лан, В. М. Лузин // Известия Транссиба. — 2010. — № 4 (4). — С. 6–11.

5. Попов, А. Ю. Технология алмазного шлифования твердосплавных изделий / А. Ю. Попов, Д. С. Реченко, Е. В. Васильев, В. С. Сергеев, А. Г. Кольцов // Вестник УГАТУ. — 2012. — Т. 16, № 4 (49) — С. 24–29.

ПОПОВ Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой металлорежущих станков и инструментов Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

БЕЛАН Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), магистрант гр. ТМ-514 факультета элитного образования ОмГТУ.

ДЮНДИН Вадим Владимирович, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения. Адрес для переписки: baltazar.13@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.06.2015 г.

© А. Ю. Попов, Д. Ю. Белан, В. В. Дюндин

КЛАССИФИКАЦИЯ, СОСТАВ, ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлена классификация и актуальность применения полимеров и композитных материалов, методы их получения и преимущества по механическим характеристикам. Более детально разобраны композитные материалы на примере углепластиков, а именно, их виды, применение и краткое описание представлены в статье. Также прилагаются таблицы и рисунки с детальным описанием технических характеристик волокон карбона и видами плетения полотна углепластика.

Ключевые слова: полимеры, композитные материалы, карбон, углепластик, углеродное волокно.

Двадцать первый век с легкостью можно назвать веком полимеров и композитных материалов.

Композитными называют материалы, созданные искусственно и представляющие собой неоднородный сплошной материал, полученный из двух или более компонентов.

Один компонент (матрица) образует непрерывную фазу, другой же является наполнителем. Композитные материалы могут быть разделены на три основных вида:

- матричные системы, состоящие из непрерывной фазы (матрицы) и дисперсной фазы (дискретных частиц);

- композиции с волокнистыми наполнителями;

- композиции, имеющие взаимопроникающую структуру двух или более непрерывных фаз.

Получение таких свойств, как повышенная жесткость, прочность, стабильность размеров, повышенная работа разрушения и ударная прочность, повышенная теплостойкость, пониженная газо- и паропроницаемость, регулируемые электрические свойства, возможно достигнуть только изменением морфологии и прочности сцепления между фазами [1].

Матрица композитного материала может быть металлической, керамической, углеродной. Наполнитель представлен в виде частиц и волокон, обладающих существенно более высокими физико-механическими свойствами, чем матрица. Частицы называют дисперсным наполнителем, они имеют неопределенную, кубическую, шарообразную или чешуйчатую форму с размерами от долей миллиметра до микронных и наноразмерных величин. Инертный наполнитель практически не изменяет

свойства композиции. Активный наполнитель существенно изменяет свойства композиции. Например, волокна имеют упругопрочностные характеристики, которые на два порядка выше свойств матрицы. Они могут быть непрерывными и короткими. Диаметр тонких волокон 5–15 мкм, толстых (борных или карбидокремниевых) — 60–100 мкм. Длина коротких волокон от 1–2 до 20–50 мм. Название композитов отвечает природе волокон: стекло-, угле-, органи-, борпластики и др. Для гибридных вариантов — стеклоуглепластики, органоборопластики и пр. [2].

Более детально хотелось бы остановиться на обзоре углепластика.

Углепластик — это композитный многослойный материал, представляющий собой полотно из углеродных волокон в оболочке из термореактивных полимерных (чаще эпоксидных) смол, Carbon-fiber-reinforced polymer (рис. 1).

Международное наименование Carbon — это углерод, из которого и получают карбоновые волокна carbon fiber.

Изначально карбон был разработан для спортивного автомобилестроения и космической техники, но, благодаря своим отличным эксплуатационным свойствам, таким как малый вес и высокая прочность, получил широкое распространение и в других отраслях промышленности. На сегодняшний день углепластиком нашли применение в таких отраслях, как самолетостроение, машиностроение, а также для изготовления бытовой и медицинской техники.

Гибкость углеродного полотна, возможность его удобного раскроя и резки, последующей пропитки

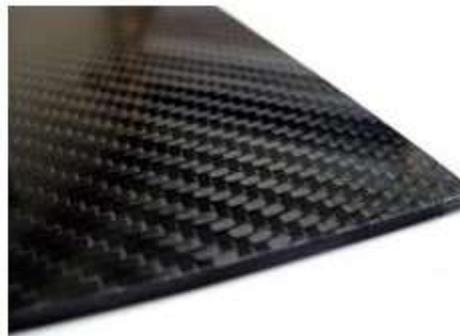


Рис. 1. Композитный материал углепластик (карбон)

Таблица 1

Технические характеристики волокон карбона

Волокно (проволока)	ρ , кг/м ³	$T_{\text{пл}}$, °C	σ_B , МПа	σ_B/ρ , МПа/кг·м ³
Алюминий	2687	660	620	2300
Асбест	2493	1521	1380	5500
Бериллий	1856	1284	1310	7100
Карбид бериллия	2438	2093	1030	4200
Углерод	1413	3700	2760	157
Стекло E	2548	1316	3450	136
Стекло S	2493	1650	4820	194
Графит	1496	3650	2760	184
Молибден	0166	2610	1380	14
Полиамид	1136	249	827	73
Полиэфир	1385	248	689	49
Сталь	7811	1621	4130	53
Титан	4709	1668	1930	41
Вольфрам	19252	3410	4270	22

эпоксидной смолой позволяют формировать карбоновые изделия любой формы и размеров, в том числе и самостоятельно. Полученные заготовки можно шлифовать, полировать, красить и наносить флексопечать [3].

Популярность углепластика объясняется его уникальными эксплуатационными характеристиками, которые получаются в результате сочетания в одном композите совершенно разных по своим свойствам материалов — углеродного полотна в качестве несущей основы и эпоксидных компаундов в качестве связующего.

Армирующий элемент, общий для всех видов углепластика, — углеродные волокна толщиной 0,005–0,010 мм, которые прекрасно работают на растяжение, но имеют высокую хрупкость на изгиб, то есть они очень изотропны, прочны только в одном направлении, поэтому их использование оправданно только в виде полотна.

Дополнительно армирование может проводиться каучуком, придающим серый оттенок карбону.

Карбон характеризуются высокой прочностью, износостойкостью, жёсткостью и малой, по сравнению со сталью, массой. Его плотность — от 1450 кг/м³ до 2000 кг/м³.

Для углеродных волокон основными механическими характеристиками являются предел прочности на растяжение σ_B и предел прочности на единицу объема, а также модуль упругости, определяющий эластичность и способность работать на изгиб [4].

Углеродные волокна обладают уникальными механическими характеристиками по сравнению с армирующими металлическими, стекловолоконным и полимерными волокнами [5] (табл. 1).

Существует взаимосвязь — чем выше предел прочности, тем ниже модуль упругости. Поэтому при подборе материала очень важно найти оптимальный баланс между этими характеристиками, подбирая слой, направление волокна, метод плетения и плотность.

Волокна, состоящие из тончайших нитей углерода, получают термической обработкой на воздухе, то есть окислением, полимерных или органических нитей (полиакрилонитрильных, фенольных, лигниновых, вязких) при температуре 250 °C в течение 24 часов, то есть практически их обугливанием. Вот так выглядит под микроскопом нить после обугливания [6] (рис. 2).

После окисления проходит карбонизация — нагрев волокна в среде азота или аргона при температурах от 800 до 1500 °C для выстраивания структур, подобных молекулам графита.

Затем проводится графитизация (насыщение углеродом) в этой же среде при температуре 1300–3000 °C.

Этот процесс может повторяться несколько раз, очищая графитовое волокно от азота, повышая концентрацию углерода и делая его прочнее. Чем выше температура, тем прочнее получается волокно. Этой обработкой концентрация углерода в волокне увеличивается до 99 % [7].

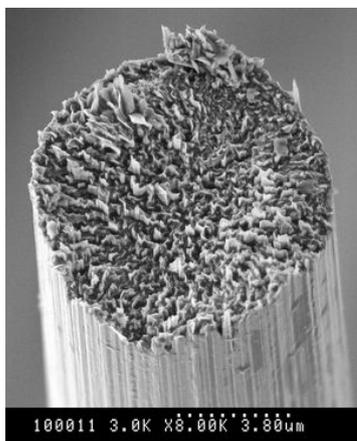


Рис. 2. Нить углерода под микроскопом после обугливания



Рис. 3. Волокна углерода, представленные в виде нитей на бобинах

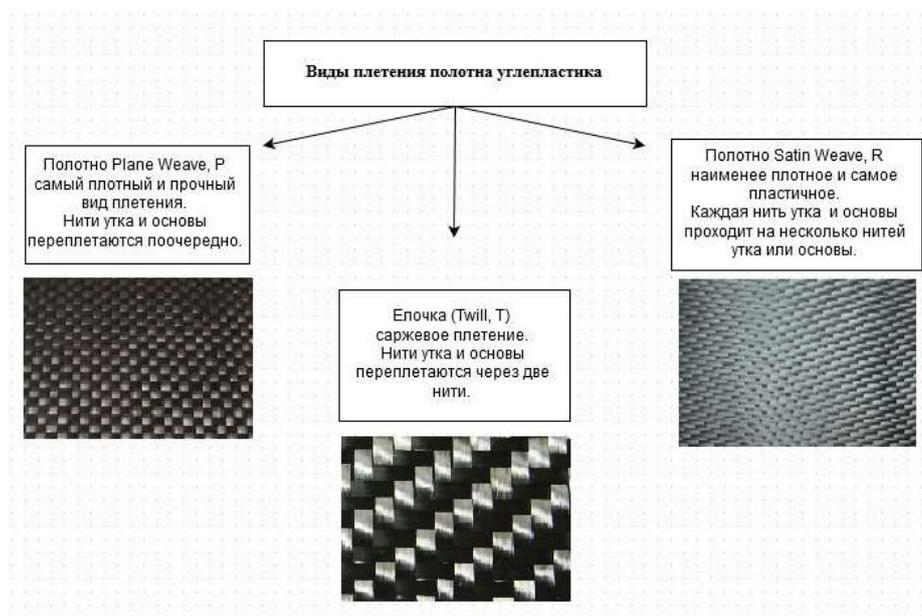


Рис. 4. Виды плетения полотна углепластика и его технические характеристики

Волокна углерода представлены в широком ассортименте, они могут быть короткими, резаными, их называют «штапелированными», а могут быть непрерывными нитями на бобилах. Это могут быть жгуты, пряжа, ровинг, которые затем используются для изготовления тканого и нетканого полотна и лент. Иногда волокна укладываются в полимерную матрицу без переплетения (UD) [8] (рис. 3).

Так как волокна отлично работают на растяжение, но плохо на изгиб и сжатие, то идеальным вариантом использования углеволокна является применение его в виде полотна Carbon Fabric. Оно получается различными видами плетения: елочкой, рогожкой и пр., имеющими международные названия Plain, Twill, Satin. Иногда волокна просто перехвачены поперек крупными стежками до заливки смолой. Правильный выбор полотна по техническим характеристикам волокна и виду плетения очень важен для получения качественного карбона (рис. 4).

В качестве несущей основы чаще всего используются эпоксидные смолы, в которых полотно

укладывается послойно, со сменой направления плетения, для равномерного распределения механических свойств ориентированных волокон. Чаще всего в 1 мм толщины листа содержится 3–4 слоя [9].

Достоинства и недостатки карбона. Более высокая цена карбона по сравнению со стеклопластиком и стекловолокном объясняется более сложной, энергоёмкой и многоэтапной технологией, дорогими смолами и более дорогостоящим оборудованием (автоклав). Но и прочность с эластичностью при этом получаются выше наряду со множеством других неоспоримых достоинств:

- легче стали на 40 %, легче алюминия на 20 % ($1,7 \text{ г/см}^3 - 2,8 \text{ г/см}^3 - 7,8 \text{ г/см}^3$);
- карбон из углерода и кевлара немного тяжелее, чем из углерода и резины, но намного прочнее, а при ударах трескается, крошится, но не рассыпается на осколки;
- высокая термостойкость: карбон сохраняет форму и свойства до температуры $2000 \text{ }^\circ\text{C}$;
- обладает хорошими виброгасящими свойствами и теплоемкостью;

- коррозионная стойкость;
- высокий предел прочности на разрыв и высокий предел упругости;
- эстетичность и декоративность.

Но по сравнению с металлическими и деталями из стекловолокна углеводородные детали имеют недостатки:

- чувствительность к точечным ударам;
- сложность реставрации при сколах и царапинах;
- выцветание, выгорание под воздействием солнечных лучей, для защиты покрывают лаком или эмалью;
- длительный процесс изготовления;
- в местах контакта с металлом начинается коррозия металла, поэтому в таких местах закрепляют вставки из стекловолокна;
- сложность утилизации и повторного использования.

Библиографический список

1. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. — М. : Машиностроение, 1990. — 512 с.
2. Обработка материалов с применением инструмента / Под ред. В. П. Смоленцева. — М. : Высш. шк.; 1983. — 247 с.
3. Кристенсен, Р. М. Введение в механику композитов / Р. М. Кристенсен. — М. : Мир, 1990. — 336 с.
4. Солнцев, Ю. П. Специальные материалы в машиностроении : учеб. для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, В. Ю. Пирайнен. — М. : Химиздат, 2014. — 638 с.
5. Титов, Ю. В. Получение ультрадисперсного порошка механическим методом с применением жидкого азота / А. Г. Кисель, А. Ю. Попов, Д. С. Реченко, В. Р. Титов, Ю. В. Титов // Нанотехника. — 2014. — № 1 (37). — С. 73–74.
6. Пат. 030364 РФ, МПК В22F 31/00. Устройство для получения металлических порошков / Д. С. Реченко, А. Ю. Попов,

Р. У. Каменов, К. К. Госина, Ю. В. Титов ; заявитель Реченко Д. С., Титов Ю. В. ; патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № ГР 2014119229/02 ; заявл. 13.05.2014 ; опубл. 10.10.14, Бюл. № 28. — 3 с.

7. Реченко, Д. С. Технология высокоскоростного затачивания твердосплавных инструментов : моногр. / Д. С. Реченко, А. Ю. Попов. — Старый Оскол : ТНТ, 2015. — 160 с.

8. Создание твердосплавного инструмента сверхскоростным шлифованием для суперфинишной лезвийной обработки / Д. С. Реченко [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 2 (140). — С. 92–94.

9. Rechenko, D. Technology high-speed sharpening carbide tools / D. Rechenko, Y. Titov, D. Balova // Machines, technologies, materials. — Bulgaria, Sofia, 2015. — Year IX, Issue 12. — P. 46–48.

ПОПОВ Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой металлорежущих станков и инструментов.

ГОСИНА Ксения Коблановна, студентка гр. КТО-124 машиностроительного института.

ПЕТРОВ Игорь Вадимович, магистрант гр. КТОМ-152 факультета элитного образования и магистратуры.

МАКАРОВА Анастасия Евгеньевна, студентка гр. КТО-134 машиностроительного института.

БАЛОВА Дарья Георгиевна, магистрант гр. КТОМ-141 факультета элитного образования и магистратуры.

ПЕПЕЛЯЕВ Алексей Вениаминович, кандидат технических наук, доцент военной кафедры.

Адрес для переписки: gosina_ksenia@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.09.2015 г.

© А. Ю. Попов, К. К. Госина, И. В. Петров, А. Е. Макарова, Д. Г. Балова, А. В. Пепеляев

Книжная полка

621.7/В75

Воронцов, А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие для вузов по направлению 150700 «Машиностроение». В 2 т. Т. 2 / А. Л. Воронцов. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2014. — 441 с.

Во втором томе учебного пособия рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований комбинированного выдавливания, радиального выдавливания, выдавливания с комбинированным нагружением, осадки, высадки, прошивки с утонением стенки, контурной осадки, калибровки, закрытой объемной штамповки, чеканки, формовки, секционной штамповки, дорнования, а также специальные операции гибки волокнистых композиционных материалов, сжатия порошковых заготовок в закрытой матрице и осадки малопластичных материалов в оболочках. Приведены формулы и методы расчета и методы расчета основных технологических параметров различных способов волочения труб и прутков. Изложен метод функции напряжений. Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Для студентов, обучающихся по направлению «Машиностроение», аспирантов и преподавателей, а также инженерно-технических и научных работников, специализирующихся в области обработки металлов давлением.

УДАРНОЕ УСТРОЙСТВО С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ МАГНИТОМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Предметом исследования является контроль материалов и конструкций с использованием электромагнитного ударного устройства. Цель работы заключается в создании ударной конструкции с увеличенной амплитудой сигнала измерительной катушки и высокой чувствительностью для обнаружения дефектов в структуре материалов. Метод относится к группе механических методов неразрушающего контроля. Предлагаемая конструкция позволяет определить наличие и местоположение дефектов в материалах, основываясь на изменении показаний величины скорости отскока бойка, пропорциональной напряжению датчика. В качестве исследуемых материалов применялись образцы из углеродистой качественной стали, легкого и тяжелого бетонов, дерева. Результатом исследования явились зависимости изменения значений напряжений при ударе по образцам с дефектами и без. Они позволяют говорить о целесообразности применения конструкции ударного устройства в дефектоскопии ввиду высокой чувствительности. По данным работы были сделаны выводы о величине сигнала и даны рекомендации по получению наибольшей чувствительности, точности и надежности эксперимента.

Ключевые слова: контроль, дефектоскопия, удар, боек, упругий отскок, ударное устройство.

Контроль материалов и конструкций с помощью упругого удара относится к группе механических методов неразрушающего контроля и позволяет определить наличие в материалах полостей и дефектов в зависимости от структуры, плотности, прочности изделий.

Согласно [1], механический удар — кратковременное механическое воздействие твердых тел при их столкновении между собой и сопутствующие этому процессу явления. Это одна из наиболее мощных и часто встречающихся динамических нагрузок. Изучение процессов теории удара и ее применение является чрезвычайно важным при применении ударных машин и механизмов в технологических целях, а также при защите сооружений, конструкций, изделий и приборов от ударных перегрузок.

При конструировании приборов, основанных на ударе, прежде всего, ставится задача увеличить скорости удара тел, использовать совместное воздействие поступательного и вращательного ударных импульсов, увеличить энергию и частоту ударов.

Характеристики удара могут быть измерены различными способами, в числе которых метод шариковых отпечатков, метод дифференцирования кривой перемещения, метод измерений со снятием индикаторной диаграммы, метод индикации мерного участка пути, метод времяпролетного датчика и дифференциального анализатора интервалов времени, а также измерения при помощи датчиков различных типов: индукционных, тензорезисторных, магнитоупругих, датчиков ударной скорости

с постоянным магнитом. Скорость отскока бойка при ударе по контролируемому материалу зависит от многих факторов: плотности, однородности структуры или наличия в ней несплошностей, прочности и других свойств. Данный метод контроля позволяет определить наличие полостей и пустот в материалах, а также их местонахождение во внутренних слоях, что позволяет свидетельствовать о качестве изделия в целом. За время удара твердых тел в месте их контакта возникают упругие волны деформаций, которые отражаются от свободных поверхностей, оказывая влияние на величину скорости отскока бойка.

Данный метод контроля является безвредным, охватывает значительную толщину исследуемого материала и позволяет контролировать широкий спектр изделий.

Для реализации данного метода контроля были разработаны несколько устройств, действие которых основано на ударе.

Устройство [2] содержит корпус, размещенный в нем ударник со штоком; наконечник, взаимодействующий с ударником, выполненный в виде шарового сегмента, сферическая часть которого обращена к ударнику, а плоская — предназначена для взаимодействия с испытуемым объектом; электромагнитный датчик скорости отскока ударника; соленоид, расположенный коаксиально ударнику и связанный через диод с источником переменного тока. Устройство имеет существенный недостаток из-за низкой производительности вследствие небольшой частоты ударов.

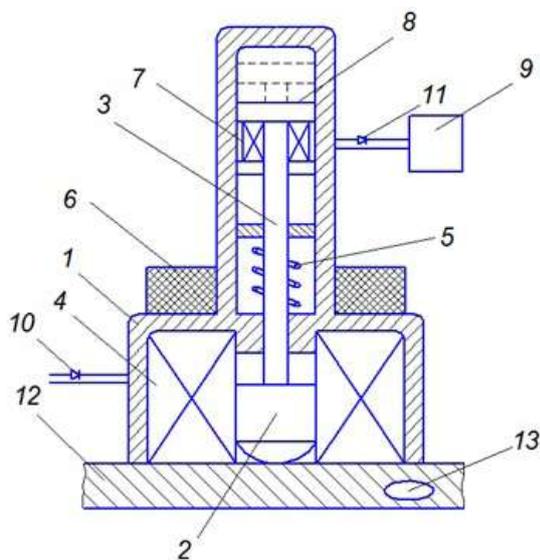


Рис. 1. Ударное устройство с измерительным кольцевым магнитом для определения дефектов:
 1 — корпус; 2 — ферромагнитный боек; 3 — шток;
 4 — соленоид; 5 — возвратная пружина; 6 — кольцо магнита; 7 — измерительная катушка; 8 — ферромагнитная головка; 9 — регистрирующий прибор; 10 — диод;
 11 — пиковый детектор; 12 — испытуемый объект;
 13 — полость или дефект

Устройство [3] снабжено ферромагнитным колпачком, жестко соединенным со штоком и постоянным магнитом электромагнитного датчика скорости, что повышает чувствительность за счет увеличения сигнала датчика скорости отскока ударника. Недостатком является малая амплитуда сигнала датчика и, как следствие, низкая чувствительность устройства.

В целях увеличения амплитуды сигнала измерительной катушки на порядок и более и в связи с этим повышения чувствительности, была разработана конструкция ударного устройства (рис. 1) с размещением дополнительного кольца магнита, закрепленного жестко на корпусе (по тугой посадке или с помощью клея и т.п.) и расположенного между верхней частью ферромагнитного бойка и измерительной катушкой, подключенной к регистрирующему прибору.

Данная конструкция содержит корпус 1, выполненный из неферромагнитного материала, в котором размещается ферромагнитный боек 2 со штоком 3, соленоид 4, закрепленный коаксиально бойку и связанный через диод 10 с источником переменного тока, возвратную пружину 5. На корпусе устройства жестко устанавливается кольцо магнита 6 между верхней частью ферромагнитного бойка и измерительной катушкой 7 с ферромагнитной головкой 8, содержащей постоянный магнит, связанной через пиковый детектор 11 с регистрирующим прибором 9. Испытуемый объект 12 имеет полость или дефект 13.

Действие устройства основано на том, что при подключении источника переменного тока включается соленоид, притягивающий ферромагнитный боек, что приводит к сжатию возвратной пружины. Соленоид выключается на половину периода переменного тока из-за диода. Боек ударяет по испытуемому материалу и отскакивает от него с определенной скоростью.

При отскоке бойка ферромагнитная головка измерительной катушки, соединенная с постоянным магнитом, совершает механический отрыв от неподвижного магнитопровода на некоторое расстояние. Сигнал при отрыве ферромагнитной головки поступает через пиковый детектор на регистрирующий прибор. Цикл повторяется. Кроме этого, сигнал в катушке значительно увеличивается за счет электромагнитного поля между ферромагнитным бойком и кольцом магнита.

Установка на неферромагнитном корпусе устройства дополнительного кольца магнита позволяет увеличить амплитуду сигнала измерительной катушки в несколько раз и повысить чувствительность прибора. Варианты размещения кольца магнита рассматривались в разных положениях на корпусе устройства, главным критерием выбора являлась величина сигнала измерительной катушки. Оптимальное положение показано на рис. 1, в таком варианте размещения амплитуда сигнала увеличилась в несколько раз. Минимальный сигнал был получен при размещении кольца магнита в относительной близости к измерительной катушке.

Для увеличения сигнала измерительной катушки необходим разрыв по наибольшей площади ее магнитопровода при нулевом зазоре в момент отскока бойка от объекта, т.е. когда электромагнитная сила F максимальна, т.к. при этом имеем и наибольшую мощность P сигнала: $P_{max} = F_{max} \cdot U$. Это достигается, например, когда ферромагнитная головка разрывает магнитопровод измерительной катушки при минимальном зазоре.

Контроль веществ и материалов с использованием данной конструкции устройства позволяет решить задачу повышения чувствительности и увеличения амплитуды сигнала измерительной катушки на порядок и более.

В результате контроля получены зависимости изменения отношения средних значений напряжений при ударе по образцу с полостями от средних значений напряжений при ударе по сплошному образцу функции удельного веса испытуемых материалов. Тарировка сигнала проводилась сначала по сплошному контролируемому материалу, а затем по материалу, содержащему дефекты и полости. Сигналы сравнивались.

Испытания проводились с каждым исследуемым образцом многократно, учитывались варианты расположения полостей и пустот в материалах вблизи и в удалении от места контакта бойка с поверхностью. По полученным данным были рассчитаны средние значения напряжений отдельно для сплошных материалов и отдельно для материалов с несплошностями.

В качестве контролируемых объектов были использованы образцы из качественной конструкционной стали — стали 45 — содержащей полости и контролируемой в положении вблизи и в удалении от места контакта с бойком, а также сплошные образцы; образцы из бетона: сплошные и с полостями; образцы из дерева: сплошные и с полостями, контроль которых производился в двух положениях: полости сверху в относительной близости к месту контакта ферромагнитного бойка с испытуемой поверхностью и полости снизу в удалении от места контакта. Регистрирующим прибором являлся милливольтметр с диапазоном измерений 0–300 мВ.

Результаты эксперимента сведены в табл. 1.

Рассчитанные отношения средних значений напряжений при ударе по образцу с полостями (ΔU_0)

№ п/п	Объект контроля	Наличие видимых полостей (+/-)	Позиция контроля	Среднее значение величины скорости отскока, пропорциональной напряжению датчика
				ΔU (ΔU_0), мВ
1	2	3	4	5
1	образец из стали 45	+	полости сверху вблизи от места удара	127
2	образец из стали 45	+	полости снизу в удалении от места удара	158
3	образец из стали 45	-	выбранная поверхность	197
4	образец из бетона (тяжелый)	-	выбранная поверхность	203
5	образец из бетона	+	полости сверху вблизи от места удара	175
6	образец из бетона (легкий)	-	выбранная поверхность	70
7	образец из бетона (легкий)	+	полости снизу в удалении от места удара	52
8	образец из дерева	+	полости сверху вблизи от места удара	167
9	образец из дерева	+	полости снизу в удалении от места удара	193
10	образец из дерева	-	вдоль волокон	213
11	образец из дерева	-	поперек волокон	128

от средних значений напряжений при ударе по сплошному образцу (ΔU) составили:

— для стали 45: удельный вес $\gamma = 7,68 \text{ г/см}^3$, отношение средних значений напряжений при ударе

по образцу с полостями к образцу сплошному составило: $\frac{\Delta U_0}{\Delta U} = \frac{127}{197} = 0,64 \text{ мВ}$; $\frac{\Delta U_0}{\Delta U} = \frac{158}{197} = 0,8 \text{ мВ}$;

— для легкого бетона: удельный вес $\gamma = 1,75 \text{ г/см}^3$, отношение средних значений напряжений при ударе по образцу с полостями к образцу сплошному со-

ставило: $\frac{\Delta U_0}{\Delta U} = \frac{52}{70} = 0,74 \text{ мВ}$;

— для тяжелого бетона, удельный вес $\gamma = 2,26 \text{ г/см}^3$, отношение средних значений напряжений при ударе по образцу с полостями к образцу сплошному составило: $\frac{\Delta U_0}{\Delta U} = \frac{175}{203} = 0,86 \text{ мВ}$;

— для дерева (сосна), удельный вес $\gamma = 0,36 \text{ г/см}^3$, отношение средних значений напряжений при ударе по образцу с полостями к образцу сплошному со-

ставило: $\frac{\Delta U_0}{\Delta U} = \frac{180}{213} = 0,85 \text{ мВ}$; $\frac{\Delta U_0}{\Delta U} = \frac{128}{180} = 0,71 \text{ мВ}$.

В зависимости от плотности испытуемого объекта для увеличения отскока бойка его можно изготавливать от сплошного ферромагнитного материала ($\rho \approx 8 \text{ г/см}^3$) до капронового ($\rho \approx 1,1 \text{ г/см}^3$) или деревянного ($\rho \leq 1 \text{ г/см}^3$), покрытого тонким слоем ферромагнитного материала, чтобы этот слой при-

тягивался соленоидом за полупериодное время его включения через диод [4].

По результатам эксперимента был построен график зависимости изменения отношения средних значений напряжений при ударе по образцу с полостями от средних значений напряжений при ударе по сплошному образцу от удельного веса испытуемых материалов (рис. 2).

Из графика видно, что в значительной степени на отскок бойка при ударе по испытуемому объекту влияет удельный вес материала, наличие полостей в структуре, а также их местоположение.

С помощью предлагаемого ударного устройства можно контролировать широкий спектр материалов: от легких деревянных и пластмассовых конструкций до тяжелых, таких как тяжелые бетоны, асфальтобетонные покрытия и металлические конструкции. В качестве рекомендации предлагается включить в список контролируемых материалов дюралюмины, титан, легированные стали, а также термически обработанные материалы.

Исходя из полученных результатов контроля, сделан соответствующий вывод о том, что величина сигнала достаточно высокая, от 52 мВ до 213 мВ, а также наибольшая чувствительность получена там, где удельный вес бойка близок к удельному весу испытуемых материалов.

Из данных, полученных в ходе исследования, можно также заключить, что для достижения наибольшей чувствительности прибора можно использовать различные модификации датчиков ударной скорости, описанные в [4].

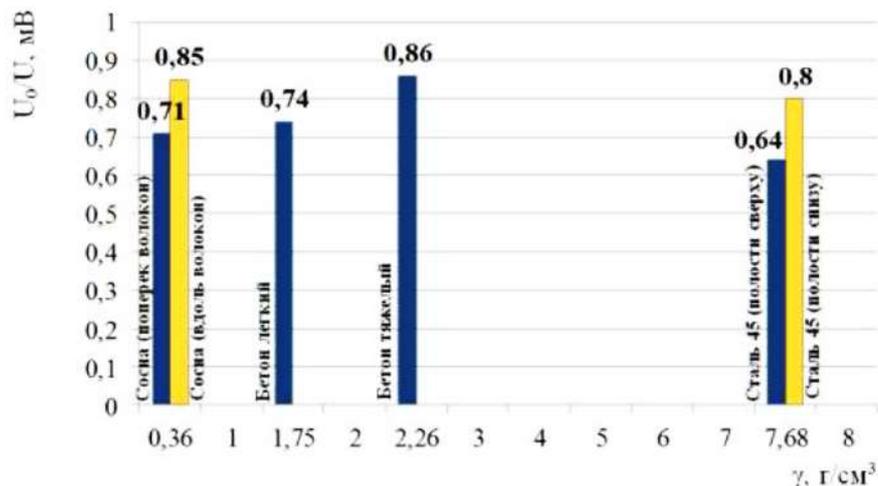


Рис. 2. Результаты исследований

Для повышения точности и надежности эксперимента можно также внести некоторые корректировки в ударный узел устройства. Для этого был разработан ударник [5], в котором боек при ударе принудительно поворачивается за счет упругого элемента, виток которого упирается в боек с некоторым смещением от центра.

Повороты бойка происходят произвольно по всем направлениям и позволяют работать в контакте с испытуемым материалом всей поверхностью, тем самым долговечность контактной зоны увеличивается в несколько раз. За счет смещения витка упругого элемента от центра бойка ударника появляется момент от пары сил F_{yg} и F_{np} на r , боек принудительно поворачивается и успевает совершить несколько отскоков при контакте с испытуемым объектом, т.е. происходит квазипластический удар.

Это позволяет повысить информативность отскока в десятки раз, что напрямую влияет на точность измерений. В предлагаемом ударнике, в отличие от ближайшего прототипа [2], отсутствует ступенька, что влечет также к повышению надежности конструкции, испытывающей огромные динамические нагрузки.

В данной работе в ударном узле использовался стальной боек.

Для получения оптимальных результатов контроля рекомендуется использовать боек, близкий по удельному весу к испытуемому материалу. Для конструкций из неферромагнитных материалов боек должен быть заключен в ферромагнитный стакан для возможности его притягивания соленоидом в момент включения через диод.

Библиографический список

1. ГОСТ 26883-86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения [Текст]. — Введ. 87—07—01. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 11 с.
2. А. с. 1758502 СССР, МПК7 G 01 N 3/52. Устройство для определения полостей и дефектов в материалах [Текст] / Б. Н. Стихановский, Л. М. Стихановская, Н. В. Захарова (СССР); заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 4697462/28; заявл. 29.05.89; опубл. 30.08.92, Бюл. № 32. — 3 с.
3. А. с. 1587688 СССР, МПК7 G 01 N 3/52. Устройство для определения дефектов в материалах [Текст] / Б. Н. Стихановский, Л. М. Стихановская (СССР); заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 4466378/25-28; заявл. 27.07.88; опубл. 07.10.90, Бюл. № 37. — 3 с.
4. Стихановский, Б. Н. Процессы удара [Текст]: моногр. / Б. Н. Стихановский. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. — 324 с.
5. Пат. 139167 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 3/52. Ударник для контроля веществ и материалов методом упругого отскока [Текст] / Стихановский Б. Н., Чернова Е. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. — № 2013117494/28; заявл. 16.04.2013; опубл. 10.04.2014. — 3 с.

СТИХАНОВСКИЙ Борис Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры информатики, прикладной математики и механики.

ЧЕРНОВА Елена Сергеевна, аспирантка кафедры информатики, прикладной математики и механики. Адрес для переписки: ilineilli@gmail.com

Статья поступила в редакцию 07.09.2015 г.

© Б. Н. Стихановский, Е. С. Чернова