

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКА

В статье приведены результаты исследований по контролю геометрической точности круглошлифовальных станков. Экспериментально доказано, что определить соосность центров можно по площади их опорной поверхности в центровом отверстии ультразвуковым методом. Ультразвуковой контроль и полученные аналитические зависимости угла перегиба осей центров от изменения площади опорной поверхности и амплитуды ультразвуковых колебаний позволяют производить при необходимости подналадку станка.

Ключевые слова: круглошлифовальный станок, центр, центровое отверстие, ультразвук, площадь опорной поверхности.

Современная номенклатура средств контроля геометрической точности круглошлифовальных станков не отличается простыми и достоверными устройствами проверки соосности центров. Стандарт ГОСТ 11654-72 предусматривает проверки соосности отверстий шпинделя передней и задней бабок, а также проверку осевого и радиального биения конических отверстий для установки центров, но все перечисленные методы очень трудоёмки, требуют высокой квалификации оператора, большого количества сопутствующих устройств и деталей для создания измерительного комплекса. Результаты таких проверок проводятся только при плановом ремонте станков и не используются для корректировки положения центров в ходе технологического процесса. В связи с этим возникла необходимость разработки простого и надёжного способа контроля геометрической точности круглошлифовальных станков, в частности соосности их центров.

В настоящее время для обнаружения поверхностных и внутренних дефектов в материалах успешно применяют методы ультразвукового контроля [1]. Наиболее широкое распространение в практике ультразвуковой дефектоскопии нашли импульсные методы, в том числе зеркально-теневой метод, удобный тем, что к детали имеется односторонний доступ совмещенного пьезопреобразователя (ПЭП) [2].

Успехи, достигнутые в области теории колебаний, позволяют применять методы ультразвуковой дефектоскопии для контроля расположения сопрягаемых соединений, которые условно можно принять неразъемными в том случае, если к ним предъявляются технологические требования постоянной жесткости номинального сопряжения и точности позиционирования [3]. Контактное взаимодействие сопрягаемых тел всегда характеризуется контактным давлением, площадью опорной поверхности, сближением и другими параметрами [4]. В данном случае фактическую площадь контакта центра станка и центрового отверстия заготовки можно считать критерием точности этого соединения. В связи с этим гео-

метрическая точность круглошлифовального станка может быть сравнительно просто определена посредством ультразвукового контроля площади опорной поверхности центра и центрового отверстия [5].

Ультразвуковой импульс проходит через заготовку и центр и в случае неплотного их прилегания отражается от воздушного зазора. Уменьшение амплитуды ультразвуковых колебаний определяет изменение плотности контакта центра и центрового отверстия, при этом максимальная амплитуда соответствует их соосности.

Для оценки точности расположения технологических баз по изменению площади их опорной поверхности были проведены экспериментальные исследования на разработанных стендах, включающих центры Морзе исполнения 4, заготовку, дефектоскоп с диапазоном толщин контролируемого материала от 1 до 999 мм, пьезоэлектрический датчик (ПЭП), узел очистки и подачи сжатого воздуха и узел контроля давления, включающий пневматический преобразователь, индикатор и манометр (рис. 1).

В экспериментах использовали ПЭП наклонного типа с углом 60° , позволяющий проводить ультразвуковое сканирование материала центра и заготовки при расположении с их конусными поверхностями в одной плоскости.

Методика эксперимента заключалась в следующем. В центры соосно устанавливали заготовку. Соосность определяли по показаниям манометра и пневматического преобразователя. Для этого в центровых отверстиях заготовки были изготовлены каналы, к которым подключается измерительная ветвь пневматического преобразователя с конической иглой. В центровом отверстии создается постоянное рабочее давление с помощью подачи сжатого воздуха.

Первый эксперимент проводился с возможностью смещения центра относительно конического отверстия заготовки в горизонтальном направлении с помощью каретки за счет микровинта (рис. 2). При наличии смещения подвижного центра и изменении

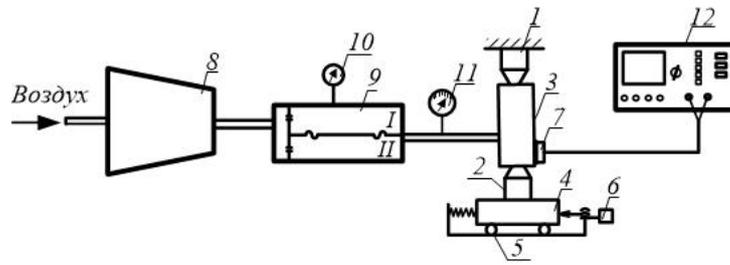


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1, 2 — центры; 3 — заготовка; 4 — каретка; 5 — направляющие; 6 — микровинт; 7 — ПЭП; 8 — компрессор для подачи сжатого воздуха; 9 — преобразователь; 10 — индикатор; 11 — манометр; 12 — дефектоскоп



Рис. 2. Общий вид стенда

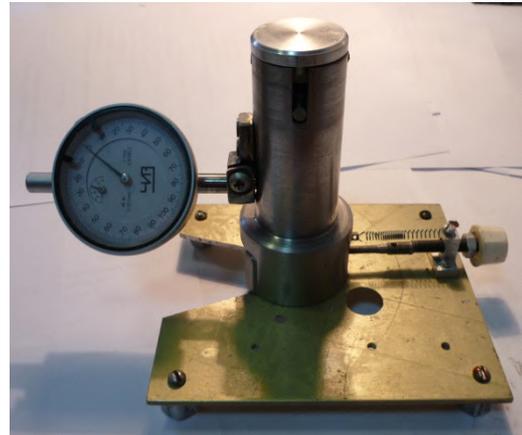
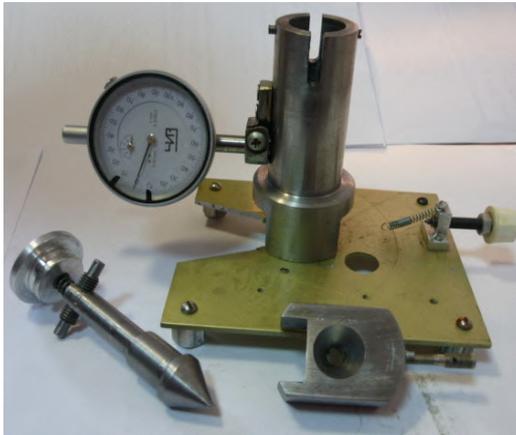


Рис. 3. Устройство смещения центра в угловом направлении

жесткости номинального сопряжения центра и заготовки происходит истечение воздуха через образовавшийся зазор, при этом давление в цепи падает. Изменение давления в системе фиксировали в зависимости от величины зазора Z по показаниям пневматического преобразователя. Пьезоэлектрический датчик плотно прижимали к фаске заготовки в сечении у центрального отверстия. Для лучшего акустического контакта преобразователь и заготовку смазывали контактирующей жидкостью.

Второй эксперимент проводился с возможностью смещения центра относительно конического отверстия заготовки в угловом направлении посредством рычага (рис. 3). При этом силовое замыкание осуществлялось пружиной 4 при движении каретки вправо и влево. Поджим конуса с коническим отверстием обеспечивала пружина 6. Угловой поворот

рычага задавали по отсчетному устройству 7. По плечу рычага и величине смещения оси центра определяли угол его поворота α .

На рис. 4 показана зависимость акустических колебаний от времени прохождения импульса при изменении площади ОП (жесткости номинального сопряжения) центра и заготовки. Первый случай (рис. 4а) соответствует соосному положению центров и отсутствию воздушного зазора между центром и центровым отверстием и, следовательно, максимальной площади ОП. По мере перекоса осей центра и центрального отверстия площадь ОП уменьшается, и ультразвуковые колебания падают (рис. 4б).

Для определения влияния на точность обработки изменения площади ОП была рассчитана ее зависимость от ультразвуковых колебаний и величины воздушного зазора. Точным способом расчета зазора

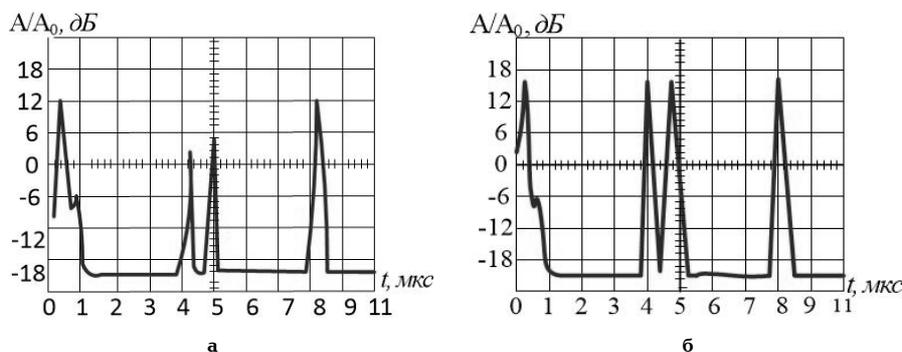


Рис. 4. Зависимости ультразвуковых колебаний A/A_0 от времени прохождения импульса t :
 а — при максимальной площади ОП (соосность центров);
 б — при минимальной площади ОП (зазор $Z = 98$ мкм)

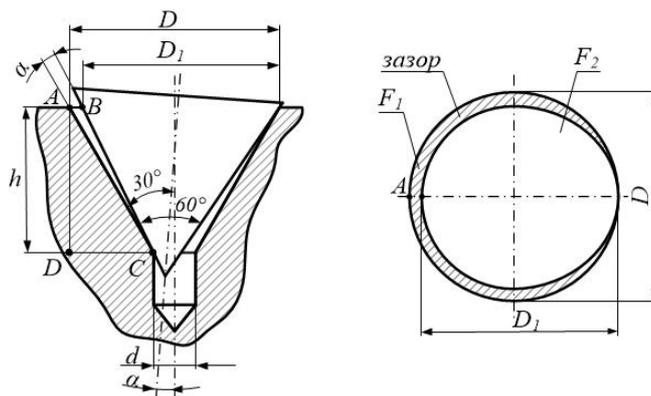


Рис. 5. Схема образования кольцевого зазора

является разложение в ряды падающей и отраженных волн, но этот путь решения весьма трудоемок, так как возникает необходимость учета большого количества членов ряда. Поэтому для расчета зазора применяют приближенные методы: лучевое (энергетическое приближение) и метод Кирхгофа, согласно которому каждую точку поверхности зазора рассматривают как вторичный излучатель звука, а поле вне дефекта считают равным нулю.

Выведем формулу для нахождения зазора, лежащего в одной плоскости с сечением центра и центрального отверстия у торца заготовки, где он будет иметь максимальное значение. В соответствии с уравнением И. Н. Ермолова для дефектов сферической формы амплитуда сигнала от отражателя с наклонным совмещенным ПЭП имеет вид [6]:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{B \cdot D \cdot S_a \cdot d \cdot \cos \alpha}{4 \cdot \lambda_t \cdot (r + \Delta r)^2 \cdot \cos \beta} \quad (1)$$

где A — амплитуда в точке измерения; A_0 — амплитуда волны, прошедшей расстояние до дефекта без учета затуханий; B — множитель, учитывающий эффект затухания; D — коэффициент прохождения волны; S_a — площадь сечения ПЭП; d — сечения опорной поверхности; r — расстояние до дефекта; Δr — приведенный путь ультразвуковой волны в призме ПЭП; λ_t — длина волны; α — угол преломления, β — угол наклона призмы.

Диаметр сечения опорной поверхности можно найти по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{on}}{\pi} + Z} \quad (2)$$

где Z — зазор при несоосности центров.

Подставим в уравнение (1) диаметр из (2) и выразим площадь сечения опорной поверхности:

$$S_{on} = \left[\frac{2 \cdot \frac{A}{A_0} \cdot \lambda_t \cdot (r + \Delta r)^2 \cdot \cos \beta}{B \cdot D \cdot S_a \cdot \cos \alpha} - Z \right]^2 \quad (3)$$

Расстояние до дефекта (зазора) находим из выражения:

$$r = \frac{c \cdot t}{2} \quad (4)$$

где t — время прохождения ультразвукового колебания от точки ввода до зазора и обратно, равное 11 мкс (определяется экспериментально по показаниям дефектоскопа).

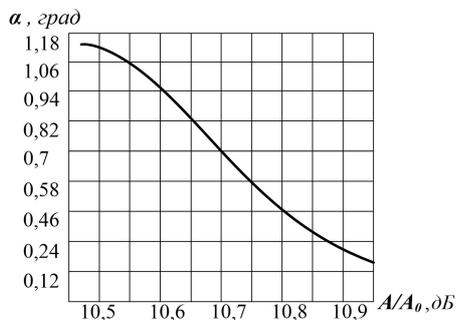
Площадь опорной поверхности центра можно найти как:

$$S_{on} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{A}{A_0} \quad (5)$$

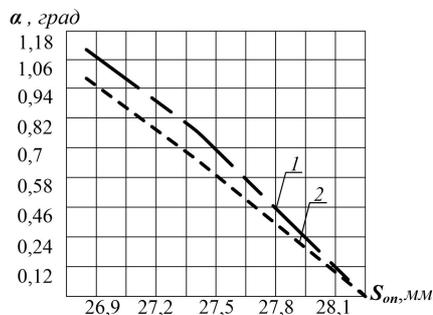
Для нахождения изменения площади опорной поверхности центра (сталь 40Х) и заготовки (сталь 40ХН) переведем экспериментальные значения A/A_0 из dB в безразмерное отношение:

$$S_{on} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot \lg \left(\left\langle \frac{A}{A_0} \right\rangle \right) \quad (6)$$

Потери давления в системе зависят от изменения величины зазора Z между конусными поверхностями центра и центрального гнезда. Чем больше воздушный



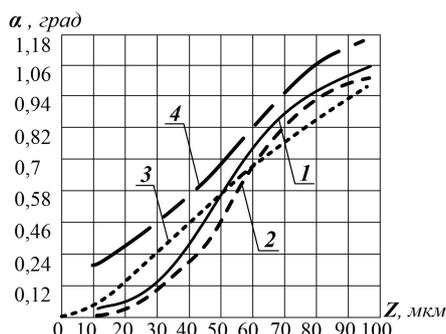
а



б

Рис. 6. Зависимость угла перекоса центра α :

а — от амплитуды ультразвуковых колебаний; б — от площади опорной поверхности S_{on} :
1 — аналитическая зависимость; 2 — эксперимент

Рис. 7. Зависимости α от Z :

1, 2 — экспериментальные исследования смещении центра (прямой и обратный ход);
3 — теоретическая зависимость;
4 — исследования при угловом смещении центра

зазор, тем больше потери давления P , меньше амплитуда колебаний A/A_0 и площадь опорной поверхности S_{on} центра и заготовки.

Исследования точности обработки на круглошлифовальных станках показали, что погрешность формы заготовок во многом определяется прецессией их оси вращения, зависящей от величины угла перекоса осей центров α . В свою очередь, значение α напрямую связано с площадью ОП центра и центрального отверстия, а значит и с амплитудой ультразвуковых колебаний. С этой целью были выполнены теоретические исследования по определению α от изменения величины Z и A/A_0 .

На рис. 5 представлена схема, поясняющая образование воздушного кольцевого зазора Z при смещении центра на угол α . Видно, что наибольшая площадь зазора F_1 образуется у торца заготовки по окружности центрального отверстия и определяется величиной отрезка AB . Примем, что площадь F_2 — окружность центра станка, тогда расстояние AB разность между диаметрами центрального отверстия D и центра D_1 , представляющее собой кольцевой зазор, равный $D_1 = D - AB$. Произведем расчет Z и установим зависимость его изменения от α . Из треугольника ABC по теореме синусов выразим AB :

$$AB = Z = \frac{4h}{\sqrt{3}(\sqrt{3}\text{ctg}\alpha + 1)}, \text{ мкм} \quad (7)$$

Окончательно зависимость α от Z (отрезок AB) будет равна:

$$\alpha = \text{arccctg} \left(\frac{4h}{3Z} - \frac{1}{\sqrt{3}} \right), \text{ град} \quad (8)$$

Выразим Z через площадь опорной поверхности:

$$Z = D - \sqrt{1,27 \cdot S_{on}} \quad (9)$$

С учетом отношений A/A_0 получим:

$$Z = D - \sqrt{10,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{A}{A_0}} \quad (10)$$

Найдем изменение угла перекоса осей центров α от величины ультразвуковых колебаний:

$$\alpha = \text{arccctg} \left(\frac{4h}{3 \cdot \left(D - \sqrt{10,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{A}{A_0}} \right) - \frac{1}{\sqrt{3}}} \right) \quad (11)$$

По полученным значениям построим график зависимости угла перекоса центра α от амплитуды колебаний и площади опорной поверхности (рис. 6). Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей показали хорошую сходимость (рис. 7).

Ультразвуковой контроль целесообразно использовать как входной контроль геометрической точности круглошлифовальных станков перед обработкой каждой новой партии заготовок другого типоразмера. Для этого следует установить оправку с акустическим преобразователем в центры станка. Если по показаниям амплитуд колебаний площадь ОП максимальна, значит, центры станка сосны, конусные опорные поверхности баз не искажены износом и погрешность базирования отсутствует.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль металлов и изделий : справ. / П. И. Беда [и др.] ; под ред. Г. С. Самойловича. — М. : Машиностроение, 1976. — 280 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справ. В 2 кн. Кн. 1 / А. С. Боровиков [и др.] ; под ред. В. В. Клюева. — 2-е изд. — М. : Машиностроение, 1986. — 487 с.
3. Моргунов, А. П. Технологическое обеспечение прочности профильных неподвижных соединений / А. П. Моргунов, В. Б. Масягин, И. В. Ревина. — М. : Технология машиностроения, 2004. — 300 с.

4. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела : учеб. пособие для вузов. — М. : Высшая школа, 1965. — 276 с.

5. Алешин, Н. П. Ультразвуковая дефектоскопия : справ. пособие / Н. П. Алешин, В. Г. Лупачев. — Мн. : Высшая школа, 1987. — 271 с.

6. Ермолов, И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. — М. : Машиностроение, 1981. — 240 с.

ЛОМОВА Ольга Станиславовна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Нефтехимические технологии и оборудование».

Адрес для переписки: 190567@mail.ru
МОРГУНОВ Анатолий Павлович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Технология машиностроения».

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, кафедра ТМ.

Статья поступила в редакцию 25.02.2015 г.

© О. С. Ломова, А. П. Моргунов

УДК 621.791.011+669.14.018

**Б. Е. ЛОПАЕВ
Р. Р. ХИСМАТУЛИН
И. И. КАГАРМАНОВ
А. М. УСТЯН**

Омский государственный
технический университет

ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА УГЛЕРОДА

На основе расчета химического эквивалента углерода проведена оценка склонности углеродистых и легированных сталей к образованию холодных трещин, относящихся к понятию «свариваемость материалов».

Ключевые слова: химический эквивалент углерода, свариваемость, холодные трещины, мартенсит, локальная концентрация, инкубационный период.

Способность материалов образовывать сварное соединение определяется испытаниями на свариваемость.

Свариваемость (соединяемость) — свойство материала образовывать неразъемное соединение с требуемым качеством и уровнем физико-механических и функциональных свойств соединения как в процессе его получения, так и при эксплуатации изделия [1].

Основные признаки, характеризующие свариваемость сталей, — склонность к образованию трещин различного типа и механические свойства сварного соединения.

По свариваемости стали подразделяют на четыре группы: первая — хорошо сваривающиеся; вторая — удовлетворительно сваривающиеся; третья — ограниченно сваривающиеся; четвертая — плохо сваривающиеся стали [2].

К первой группе относятся стали, сварка которых может быть выполнена по обычной технологии, т.е. без подогрева до сварки и в процессе сварки и без последующей термообработки. Однако применение термообработки для снятия внутренних напряжений не исключается.

Ко второй группе относят стали, при сварке которых в нормальных производственных условиях трещин не образуется. В эту же группу входят стали, которые для предупреждения образования трещин нуждаются в предварительном подогреве, а также в предварительной и последующей термообработке.

К третьей группе относят стали, склонные в обычных условиях сварки к образованию трещин. При сварке их предварительно подвергают термообработке и подогревают. Кроме того, большинство сталей, входящих в эту группу, подвергают термообработке после сварки.

К четвертой группе относят стали, наиболее трудно поддающиеся сварке и склонные к образованию трещин. Эти стали свариваются ограниченно, поэтому сварку их выполняют с обязательной предварительной термообработкой, с подогревом в процессе сварки и последующей термообработкой.

При сварке углеродистых и легированных сталей свариваемость определяется испытаниями на склонность к образованию холодных трещин.

Известно, что холодные трещины возникают в металле зоны термического влияния при наличии трех условий: образования закалочных микроструктур (мартенсита); наличия диффузионного водорода и растягивающих напряжений [3].

Для оценки склонности металла к образованию холодных трещин используют понятие химического эквивалента углерода. В основу математического подхода к описанию химического эквивалента углерода было положено предположение, что свариваемость можно определить по показателю, определяющему, какое минимальное критическое время охлаждения необходимо, чтобы в металле шва образовалось 100 % мартенсита. Чем меньше подгото-

Химический состав исследуемых сталей, %

Таблица 1

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
Низкоуглеродистые							
Сталь Ст 3 сп	0,14–0,22	0,12–0,30	0,40–0,65	0,30	0,30	–	0,25
Сталь 20	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	0,30	<0,30	–	0,25
Сталь 20г	0,17–0,24	0,17–0,37	0,70–1,00	0,25	<0,25	–	–
Сталь 15	0,12–0,19	0,17–0,37	0,35–0,65	0,30	0,30	–	0,30
Среднеуглеродистые							
Сталь Ст 4 сп	0,18–0,27	0,12–0,30	0,40–0,70	–	–	–	–
Сталь Ст 5 сп	0,28–0,37	0,15–0,35	0,50–0,80	–	–	–	–
Сталь 25	0,22–0,30	0,17–0,37	0,50–0,80	–	<0,25	–	–
Сталь 40	0,37–0,45	0,17–0,37	0,50–0,81	–	<0,25	–	–
Низколегированные							
15ХСНД	0,12–0,18	0,40–0,70	0,40–0,70	0,3–0,6	0,6–0,9	–	0,20–0,4
10Г2С1	≤0,12	0,90–1,20	1,30–1,65	≤0,30	≤0,30	–	≤0,30
20ХМ	0,15–0,25	0,17–0,37	0,40–0,70	–	0,8–1,1	0,40–0,60	–
10Г2Б	≤0,12	0,17–0,37	1,20–1,60	≤0,30	≤0,30	–	≤0,30
17ГС	0,14–0,20	0,40–0,60	1,0–1,40	≤0,30	≤0,30	–	≤0,30
16Г2АФ	0,12–0,18	0,17–0,37	1,30–1,70	–	–	–	–
Среднелегированные							
12Х5МА	0,15	0,6	0,5	–	4,0–6,0	0,5–0,6	–
20Х2МА	0,18–0,24	0,17–0,37	0,30–0,70	0,3–0,7	2,1–2,4	0,25–0,35	–
30ХН2МФА	0,26–0,33	0,17–0,37	0,30–0,60	2,0–2,5	0,6–0,9	0,20–0,30	–
06НЗ	0,04–0,08	0,3	0,5	3,0–4,0	–	–	–
20ХГСА	0,17–0,23	0,90–1,20	0,80–1,10	–	0,8–1,1	–	–
30ХГСНА	0,27–0,34	0,90–1,20	1,00–1,30	1,4–1,8	0,9–1,2	–	–

вительного времени необходимо для образования 100 %-й мартенситной структуры (т.е. чем выше критическая скорость охлаждения), тем лучше свариваемость и выше сопротивление образованию холодных трещин. Это свидетельствует о том, что подготовительные процессы, связанные с образованием холодных трещин, имеют диффузионный характер, и напрямую связаны с перераспределением водорода в металле шва. В случае малого инкубационного периода (1–10 с) образования мартенсита водород быстро фиксируется в металле шва, однако его локальная концентрация оказывается не достаточной для инициирования образования холодных трещин. В случае длительного инкубационного периода образования мартенсита (1000–2000 с) времени оказывается вполне достаточно для охрупчивания свариваемого металла в результате действия водорода. При малом инкубационном периоде, но последующей длительной выдержке возможно постепенное перераспределение водорода, что и вызывает эффект замедленного разрушения.

Уравнение химического эквивалента углерода имеет вид [3]:

$$CE_M = C + \frac{1}{38} \cdot Si + \frac{1}{6,0} \cdot Mn + \frac{1}{12} \cdot Ni + \frac{1}{1,8} \cdot Cr + \frac{1}{2,3} \cdot Mo + \frac{1}{9,1} \cdot Cu, \% \quad (1)$$

где C, Si, Mn и т.д. — концентрация химических элементов, %.

Оценка закаливается металла ЗТВ рассчитывается по уравнению:

$$\ln(\Delta t_M) = A \cdot CE_M + B, \quad (2)$$

где A , B — константы ($A = 11,26$; $B = -3,51$), индекс « M » относится к мартенситу, Δt_M — критическое время охлаждения от температуры от 800 до 500 °C, с.

При CE_M от 0,2 до 0,45 % стали обладают хорошей свариваемостью; при

$CE_M = 0,46–0,576$ % — удовлетворительной; при $CE_M = 0,577–0,782$ % — ограниченной и при $CE_M = 0,783–1,0$ % — плохой свариваемостью [3].

Целью настоящей работы является определение свариваемости по химическому эквиваленту углерода некоторых низко- и среднеуглеродистых, низко- и среднелегированных сталей, химический состав которых приведен в табл. 1.

Расчеты CE_M и $\ln(\Delta t_M)$ приведены ниже, а графические зависимости $\ln(\Delta t_M)$ от CE_M представлены на рис. 1–4.

Расчет CE_M и $\ln(\Delta t_M)$ по уравнениям (1) и (2)

Низкоуглеродистые стали

Сталь Ст. 3 сп

$$CE_M = 0,14 + \frac{0,12}{38} + \frac{0,40}{6,0} + \frac{0,30}{12} + \frac{0,30}{1,8} + \frac{0,25}{9,1} = 0,427, \% ;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,427 - 3,51 = 1,29$$

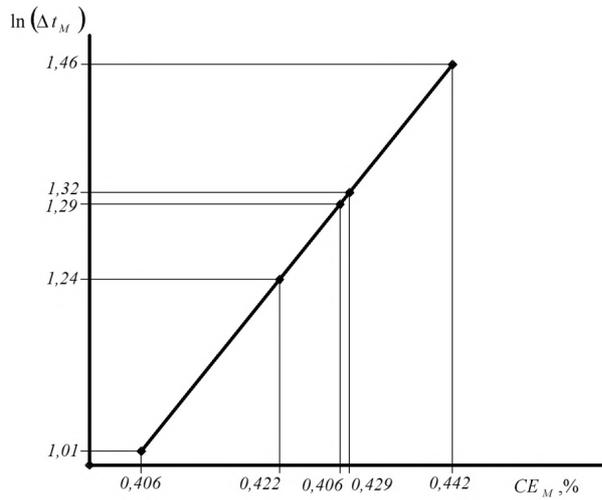


Рис. 1. Влияние CE_M на $\ln(\Delta t_M)$
для хорошо сваривающихся сталей:
Ст. 3 сп, 20, 20Г, 15, Ст. 4 сп, 25, 06НЗ

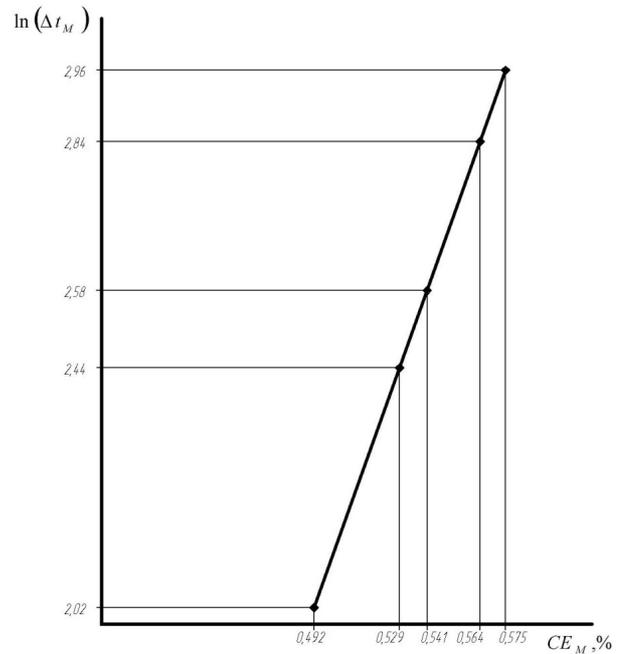


Рис. 2. Влияние CE_M на $\ln(\Delta t_M)$
для удовлетворительно сваривающихся сталей:
Ст. 5 сп, 15ХСНД, 10Г2С1, 10Г2Б, 17ГС, 16Г2АФ

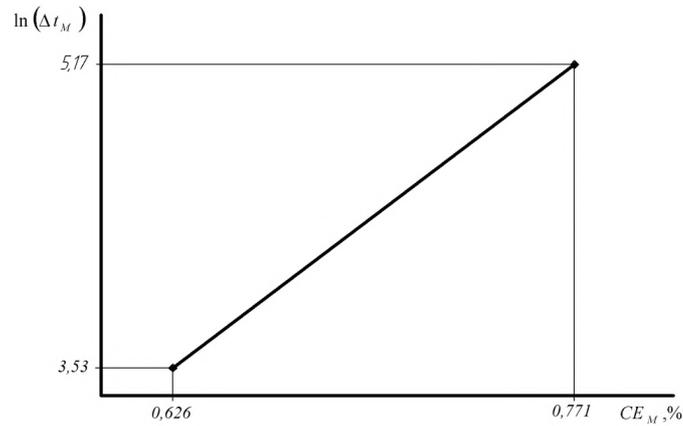


Рис. 3. Влияние CE_M на $\ln(\Delta t_M)$
для ограниченно сваривающихся сталей: 40, 20ХГСА

Сталь 20

$$CE_M = 0,17 + \frac{0,17}{38} + \frac{0,35}{6,0} + \frac{0,30}{12} + \frac{0,25}{1,8} + \frac{0,25}{9,1} = 0,422, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,42 - 3,51 = 1,24$$

Сталь 20Г

$$CE_M = 0,17 + \frac{0,17}{38} + \frac{0,35}{6,0} + \frac{0,30}{12} + \frac{0,25}{1,8} + \frac{0,25}{9,1} = 0,422, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,442 - 3,51 = 1,46$$

Сталь 15

$$CE_M = 0,12 + \frac{0,17}{38} + \frac{0,35}{6,0} + \frac{0,30}{12} + \frac{0,30}{1,8} + \frac{0,30}{9,1} = 0,406, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,406 - 3,51 = 1,06$$

У всех вышеперечисленных низкоуглеродистых сталей химический эквивалент углерода $CE_M < 0,45$, поэтому они относятся к хорошо сваривающимся сталям.

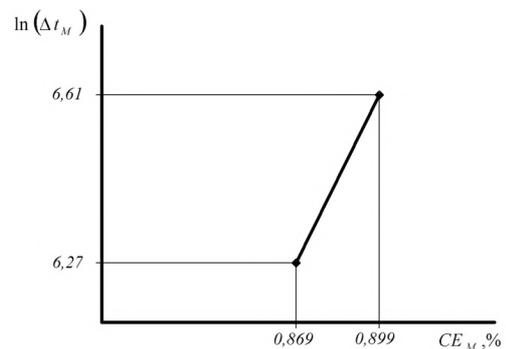


Рис. 4. Влияние CE_M на $\ln(\Delta t_M)$
для плохо сваривающихся сталей:
20ХМ, 12Х5МА, 20Х2МА, 30ХН2МФА, 30ХГСА

Среднеуглеродистые стали

Сталь Ст. 4 сп

$$CE_M = 0,27 + \frac{0,30}{38} + \frac{0,70}{6,0} = 0,394, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,394 - 3,51 = 0,92$$

Оценка свариваемости сталей

Марка стали	$CE_M, \%$	$\ln(\Delta t_M)$	$\Delta t_M, \text{с}$	Свариваемость
Низкоуглеродистые				
Сталь Ст 3 сп	0,427	1,29	3,661	хорошая
Сталь 20	0,422	1,24	3,459	хорошая
Сталь 20г	0,442	1,46	4,331	хорошая
Сталь 15	0,406	1,06	2,889	хорошая
Среднеуглеродистые				
Сталь Ст 4 сп	0,394	0,92	2,524	хорошая
Сталь Ст 5 сп	0,492	2,02	7,606	удовлетворительная
Сталь 25	0,429	1,32	3,743	хорошая
Сталь 40	0,626	3,53	34,398	ограниченная
Низколегированные				
15ХСНД	0,575	2,96	19,375	удовлетворительная
10Г2С1	0,564	2,84	17,115	удовлетворительная
20ХМ	0,869	6,27	531,126	плохая
10Г2Б	0,529	2,44	11,542	удовлетворительная
17ГС	0,541	2,58	13,210	удовлетворительная
16Г2АФ	0,464	1,71	5,551	удовлетворительная
Среднелегированные				
12Х5МА	3,842	39,75	$1,833 \cdot 10^{17}$	плохая
20Х2МА	1,534	11,98	160011,345	плохая
30ХН2МФА	0,899	6,61	743,969	плохая
06НЗ	0,402	1,01	2,762	хорошая
20ХГСА	0,771	5,17	176,09	ограниченная
30ХГСНА	1,076	8,42	4536,90	плохая

Сталь Ст. 5 сп

$$CE_M = 0,35 + \frac{0,35}{38} + \frac{0,80}{6,0} = 0,492, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,492 - 3,51 = 2,02$$

Сталь 25

$$CE_M = 0,22 + \frac{0,17}{38} + \frac{0,50}{6,0} + \frac{0,22}{1,8} = 0,429, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,429 - 3,51 = 1,32$$

Сталь 40

$$CE_M = 0,40 + \frac{0,17}{38} + \frac{0,50}{6,0} + \frac{0,25}{1,8} = 0,626, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,626 - 3,51 = 3,53$$

У сталей Ст. 4 и 25 химический эквивалент углерода $CE_M < 0,45 \%$, и они относятся к хорошо свариваемым сталям. У стали 40 $CE_M = 0,626 \%$, поэтому ее можно отнести к ограниченно свариваемым, сталь Ст. 5 $CE_M = 0,492 \%$, поэтому она относится удовлетворительно свариваемым сталям.

Низколегированные стали

Сталь 15ХСНД

$$CE_M = 0,12 + \frac{0,40}{38} + \frac{0,40}{6,0} + \frac{0,30}{12} + \frac{0,60}{1,8} + \frac{0,20}{9,1} = 0,575, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,57 - 3,51 = 2,96$$

Сталь 10Г2С1

$$CE_M = 0,10 + \frac{0,9}{38} + \frac{1,3}{6,0} + \frac{0,30}{12} + \frac{0,30}{1,8} + \frac{0,30}{9,1} = 0,564, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,564 - 3,51 = 2,84$$

Сталь 20ХМ

$$CE_M = 0,18 + \frac{0,17}{38} + \frac{0,40}{6,0} + \frac{0,8}{1,8} + \frac{0,40}{2,3} = 0,869, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,869 - 3,51 = 6,27$$

Сталь 10Г2Б

$$CE_M = 0,10 + \frac{0,17}{38} + \frac{1,2}{6,0} + \frac{0,30}{12} + \frac{0,30}{1,8} + \frac{0,30}{9,1} = 0,529, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,529 - 3,51 = 2,44$$

Сталь 17ГС

$$CE_M = 0,14 + \frac{0,40}{38} + \frac{1,0}{6,0} + \frac{0,30}{12} + \frac{0,30}{1,8} + \frac{0,30}{9,1} = 0,541, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,541 - 3,51 = 2,58$$

Сталь 16Г2АФ

$$CE_M = 0,18 + \frac{0,37}{38} + \frac{1,65}{6,0} = 0,464, \%;$$

$$\ln(\Delta t_M) = ACE_M + B = 11,26 \cdot 0,464 - 3,51 = 1,71$$

Стали 10Г2С1, 10Г2Б, 17ГС, 15ХСД, 16Г2АФ относятся к удовлетворительно свариваемым сталям, 20ХМ — к плохо свариваемым сталям.

Среднелегированные стали

Сталь 12Х5МА

$$CE_M = 0,15 + \frac{0,6}{38} + \frac{0,5}{6,0} + \frac{6}{1,8} + \frac{0,6}{2,3} = 3,842, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 3,842 - 3,51 = 39,75$$

Сталь 20Х2М2

$$CE_M = 0,18 + \frac{0,17}{38} + \frac{0,3}{6,0} + \frac{0,3}{12} + \frac{2,1}{1,8} + \frac{0,25}{2,3} = 1,534, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 1,534 - 3,51 = 11,98$$

Сталь 30ХН2МФА

$$CE_M = 0,26 + \frac{0,17}{38} + \frac{0,3}{6,0} + \frac{2,0}{12} + \frac{0,6}{1,8} + \frac{0,20}{2,3} = 0,899, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,899 - 3,51 = 6,6$$

Сталь 06НЗ

$$CE_M = 0,06 + \frac{0,30}{38} + \frac{0,50}{6,0} + \frac{3,0}{12} = 0,402, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,402 - 3,51 = 1,01$$

Сталь 20ХГСА

$$CE_M = 0,17 + \frac{0,9}{38} + \frac{0,8}{6,0} + \frac{0,8}{1,8} = 0,771, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 0,771 - 3,51 = 5,1$$

Сталь 30ХГСНА

$$CE_M = 0,27 + \frac{0,9}{38} + \frac{1,0}{6,0} + \frac{1,4}{12} + \frac{0,9}{1,8} = 1,076, \%$$

$$\ln(\Delta t_M) = 11,26 \cdot 1,076 - 3,51 = 8,4$$

Сталь 06НЗ имеет $CE_M = 0,402$, она относится к хорошо свариваемым сталям. Сталь 20ХГСА имеет $CE_M = 0,771$, поэтому она относится к ограниченно свариваемым сталям. Стали 12Х5МА, 20Х2М2, 30ХН2МФА, 30ХСНА относятся к плохо свариваемым сталям.

Полученные в результате расчета CE_M и $\ln(\Delta t_M)$ сводим в табл. 2.

Построим графические зависимости химического эквивалента углерода от логарифма критического времени охлаждения 100 % мартенсита по группам свариваемости.

Например, для построения графика «свариваемость хорошая» необходимо из табл. 2 выбрать значения CE_M в пределах 0,2–0,45 % и соответствующие им значения $\ln(\Delta t_M)$. Таким же образом нужно по-

ступить для построения графиков соответствующих удовлетворительной, ограниченной и плохой свариваемостям (рис 2–4).

Из табл. 2 видно, что чем меньше критическое время охлаждения 100 % мартенсита, тем меньше значение химического эквивалента углерода, тем выше свариваемость и тем меньше вероятность образования холодных трещин в углеродистых и легированных сталях.

При малом значении времени (1–10) с локальная концентрация водорода недостаточна для образования холодных трещин.

Численное значение времени, влияющее на свариваемость сталей (табл. 2) можно распределить так: (1–5) с — хорошая; (5–18) с — удовлетворительная; при $\Delta t_M > 18$ с — ограниченная и плохая свариваемости.

Таким образом, изложенные в статье сведения будут полезны разработчикам свариваемых материалов, технологам при проектировании технологии сварки различных конструкций, студентам при изучении дисциплины «Теория сварочных процессов».

Библиографический список

1. Ющенко, К. А. Свариваемость и перспективные процессы сварки материалов [Текст] / К. А. Ющенко // Автоматическая сварка. — 2004. — № 9. — С. 40–45.
2. Справочник сварщика / Под ред. В. В. Степанова. — 3-е изд. — М.: Машиностроение, 1974. — 520 с.
3. Костин, В. А. Математическое описание углеродного эквивалента как критерия оценки свариваемости сталей [Текст] / В. А. Костин // Автоматическая сварка. — 2012. — № 8. — С. 12–17.
4. Технология электрической сварки металла и сплавов плавлением [Текст] / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.

ЛОПАЕВ Борис Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение».

ХИСМАТУЛИН Роман Рафикович, студент гр. С-510 машиностроительного института.

КАГАРМАНОВ Игорь Игоревич, студент гр. СМ-312 машиностроительного института.

УСТЯН Армен Манвелович, магистрант гр. СПМ-514 машиностроительного института.

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 26.02.2015 г.

© Б. Е. Лопаяев, Р. Р. Хисматулин, И. И. Кагарманов, А. М. Устьян

Книжная полка

Мылов, Г. В. Методологические основы автоматизации конструкторско-технологического проектирования гибких многослойных печатных плат / Г. В. Мылов, А. И. Таганов. — М.: Горячая линия-Телеком, 2014. — 167 с. — ISBN 978-5-9912-0367-8.

Изложены методологические основы, включающие в себя современную концепцию построения информационного сопровождения стадий жизненного цикла гибких многослойных печатных плат (ГМП), основы анализа и синтеза проектных конструкторско-технологических решений и информационной поддержки этапов автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства изделий ГМП. Для специалистов, будет полезна аспирантам и студентам.

ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВПРЫСКА ТОПЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛЕЙ С ЦИЛИНДРОВОЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 250 кВт

Приведены методика расчета и номограммы для выбора эффективного проходного сечения распылителей форсунок для дизелей различной цилиндровой мощностью. Предложена диаграмма, позволяющая в зависимости от давления топлива в аккумуляторе и времени впрыска, определять цикловую подачу при однофазных и многофазных впрысках.

Ключевые слова: распылитель, эффективное проходное сечение, сопловые отверстия, дифференциальная характеристика впрыска.

Главным параметром распылителя форсунки является его эффективное проходное сечение μF , определяемое при подъеме иглы. Величина μ называется коэффициентом расхода, который равен 0,62–0,82 [1] и представляет собой отношение действительного расхода к теоретическому расходу. Суммарная площадь сопловых отверстий F зависит от диаметра отверстий и их количества. Величина μF для распылителей дизелей с цилиндровой мощностью от 10 до 250 кВт лежит в пределах 0,1–1,0 мм².

В качестве примера определим расчетным путем суммарное значение проходного сечения сопловых отверстий распылителя, их число и диаметр для подачи топлива в камеру сгорания дизеля КамАЗ-740.63-400 мощностью 295 кВт при частоте вращения вала двигателя 1900 мин⁻¹. Мощность одного цилиндра равна 36,9 кВт. Среднее давление перед сопловыми отверстиями принимаем равным 40 МПа (максимальное 67 МПа), а плотность топлива — 850 кг/м³.

Процесс подачи топлива осуществляется при помощи насоса высокого давления, который соединен трубопроводом с форсункой. На рис. 1 приведена конструкция форсунки с гидромеханическим управлением хода иглы. Давление начала открытия иглы форсунки равно 26^{+0,5} МПа, диаметр иглы 5 мм, число сопловых отверстий в распылителе 5, а их диаметр равен 0,3 мм.

Для полной мощности дизеля КамАЗ-740.63-400 определим цикловую подачу топлива в мм³ по формуле [2]:

$$q_u = \frac{q_e \cdot N_e \cdot 1000}{i \cdot n_n \cdot \rho_T \cdot 60} = \frac{210 \cdot 295 \cdot 1000}{8 \cdot 950 \cdot 0,85 \cdot 60} = 160, \quad (1)$$

где q_e — удельный эффективный расход топлива, 210 г/(кВт·ч); N_e — полная (номинальная) мощность дизеля, 295 кВт; i — число цилиндров, 8; n_n — частота вращения вала насоса, 950 мин⁻¹; ρ_T — плотность топлива, 0,85 г/см³.

Для оценки расчетного значения μF определим теоретическую скорость истечения дизельного топлива через сопловые отверстия

$$\vartheta_T = \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho_T}, \quad (2)$$

где ΔP — средний перепад давления топлива перед сопловыми отверстиями, Па (Н/м²) берется с учётом давления газов в цилиндре.

$$\vartheta_T = \sqrt{2 \cdot 400 \cdot 10^5 / 850} = 306 \text{ м/с}. \quad (3)$$

Объемный расход топлива Q в м³/с определим из выражения

$$Q = \mu F \cdot \vartheta_T, \quad (4)$$

где μF — эффективное проходное сечение распылителя, м².

Объемный расход топлива за цикл в мм³/с определим по его количеству (q_u), поданному в камеру сгорания за время впрыска τ

$$Q = q_u / \tau. \quad (5)$$

Зная продолжительность впрыска φ_B в градусах (например, 10°), частоту вращения вала насоса n_n в мин⁻¹, время впрыска определим из выражения

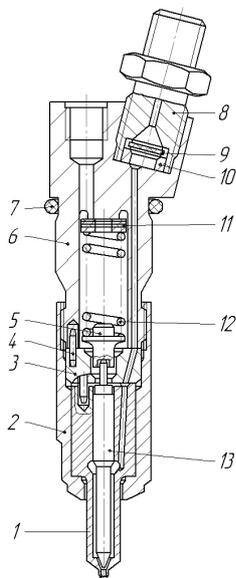


Рис. 1. Форсунка:

- 1 — корпус распылителя с сопловыми отверстиями; 2 — гайка;
3 — проставка; 4 — штифт; 5 — штанга;
6 — корпус форсунки; 7 — кольцо;
8 — штуцер; 9 — фильтр; 10 — прокладка;
11 — регулировочные прокладки;
12 — пружина; 13 — игла

$$\tau = \frac{\varphi_B}{6 \cdot n_n} = \frac{10}{6 \cdot 950} = 0,001754 \text{ с.} \quad (6)$$

Величина действительного объёмного расхода топлива через форсунку составит $Q = 160 / 0,001754 = 914285 \text{ мм}^3/\text{с} = 0,000914 \text{ м}^3/\text{с}$, откуда

$$\mu F = Q / \vartheta_T, \quad (7)$$

$$\mu F = 0,000914 / 306 = 0,00000299 \text{ м}^2 = 0,3 \text{ мм}^2.$$

Цикловая подача топлива проверялась по формуле (8) и равна расчетной величине, полученной из выражения (1)

$$q_u = \mu F \cdot \tau \cdot \vartheta_A \cdot 1000 = 0,3 \cdot 0,001754 \cdot 306 \cdot 1000 = 160 \text{ мм}^3. \quad (8)$$

При коэффициенте расхода, равном 0,8, суммарная площадь сопловых отверстий составит $0,375 \text{ мм}^2$. При числе сопловых отверстий 5, площадь сечения одного сопла F_c составит $0,075 \text{ мм}^2$. По известной величине площади соплового отверстия определим его диаметр d_c

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot F_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,075}{3,14}} = 0,3 \text{ мм.} \quad (9)$$

Для определения необходимого значения μF в зависимости от цикловой подачи топлива q_u и продолжительности впрыска φ_B (интенсивности подачи топлива) предлагается номограмма [2]. Общая формула для расчета номограммы имеет вид

$$q_u = \mu F \cdot \frac{\varphi_B}{6 \cdot n_n} \cdot \sqrt{2 \Delta P / \rho_T} \cdot 1000. \quad (10)$$

Величина скорости ϑ_T зависит от ΔP . Так, для $\Delta P = 40 \text{ МПа}$ значение ϑ_T достигает 306 м/с . Для постоянных значений μF , ΔP и n_n , но переменной φ_B (например, 10; 15; 20; 25°) определялась величина q_u .

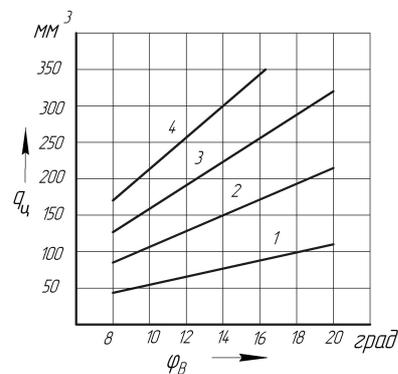


Рис. 2. Номограмма для определения μF в зависимости от q_u и φ_B :
1 — $0,1 \text{ мм}^2$; 2 — $0,2 \text{ мм}^2$; 3 — $0,3 \text{ мм}^2$; 4 — $0,4 \text{ мм}^2$

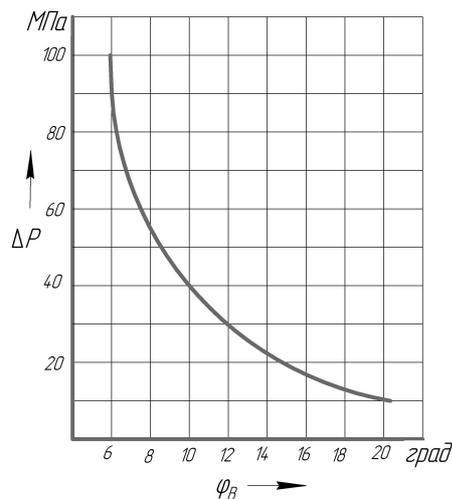


Рис. 3. Влияние давления топлива перед сопловыми отверстиями на продолжительность впрыска

По найденным значениям q_u проводилась линия (например, для $\mu F = 0,1 \text{ мм}^2$).

Каждая линия поля номограммы соответствовала постоянному значению μF и неизменной скорости истечения топлива из сопла ϑ_T . Изменялась только продолжительность впрыска φ_B , а определялась цикловая подача топлива q_u .

На рис. 2 представлена номограмма, построенная для $n_n = 950 \text{ мин}^{-1}$, $\Delta P = 40 \text{ МПа}$, $\rho_T = 850 \text{ кг/м}^3$. Номограмма позволяет предварительно оценить величину эффективного проходного сечения распылителей для тракторных и автомобильных дизелей с цилиндровой мощностью от 10 до 70 кВт.

По данной номограмме для заданной цикловой подачи топлива и требуемой продолжительности впрыска рекомендуется выбирать соответствующую величину эффективного проходного сечения распылителя. Например, для цикловой подачи топлива $q_u = 160 \text{ мм}^3$ и $\varphi_B = 10^\circ$ величина $\mu F = 0,3 \text{ мм}^2$. Выбранная величина μF уточняется при доводке рабочего процесса дизеля.

На рис. 3 показана кривая зависимости продолжительности впрыска от величины давления перед сопловыми отверстиями ΔP . Необходимую интенсивность впрыска можно получить не только подбором μF , но и величины давления ΔP . С увеличением давления ΔP продолжительность впрыскивания φ_B уменьшается. График построен для $n_n = 950 \text{ мин}^{-1}$, $q_u = 160 \text{ мм}^3$ и $\mu F = 0,3 \text{ мм}^2$.

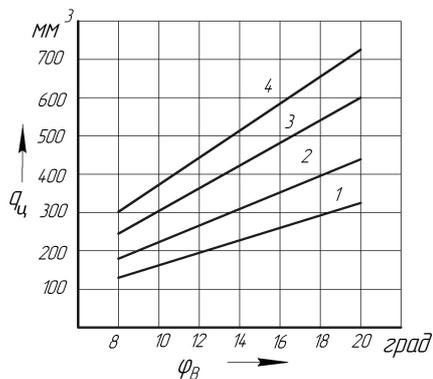


Рис. 4. Номограмма для определения μF в зависимости от q_u и ϕ_B :
1 — 0,3 мм²; 2 — 0,4 мм²; 3 — 0,5 мм²; 4 — 0,6 мм²

На рис. 4 показана номограмма, которая построена для $n_n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $\Delta P = 40 \text{ МПа}$, $\rho_T = 850 \text{ кг/м}^3$. Номограмма позволяет определить μF для дизелей с цилиндровой мощностью от 40 до 120 кВт.

На рис. 5 предложена номограмма, построенная для $n_n = 500 \text{ мин}^{-1}$, $\Delta P = 40 \text{ МПа}$, $\rho_T = 850 \text{ кг/м}^3$. Номограмма позволяет определить эффективное проходное сечение распылителей для тепловозных и судовых дизелей цилиндровой мощностью от 100 до 250 кВт.

Основным недостатком форсунок с гидромеханическим управлением иглы является неизменность характеристики подачи топлива на конкретном режиме работы двигателя, что не позволяет изменять ее форму и разбивать на требуемые участки. На рис. 6 представлена дифференциальная характеристика впрыска топлива дизеля КамАЗ-740 при его работе с $q_u = 100 \text{ мм}^3$ на режиме номинальной мощности [3]. Дифференциальная характеристика представляет собой расход топлива, поступивший из распылителя в любой момент времени.

Для изменения характеристики впрыска используют, например, аккумуляторные системы подачи топлива с электронным управлением хода иглы форсунок [4]. Это позволяет получать многофазные характеристики впрыска топлива, а также изменять угол опережения подачи топлива. Управление процессом впрыска способствует снижению расхода топлива, уменьшению жесткости сгорания и токсичности отработавших газов.

На рис. 7 приведена принципиальная схема форсунки с электрогидравлическим управлением хода иглы. Под действием пружины 2 якорь 3 находится в нижнем положении и конусом штока закрывает отсечное отверстие 4. Из аккумулятора 12 с постоянным давлением, например, 100 МПа топливо поступает в подводящий канал 10 форсунки, а также через впускной канал 11 в камеру управления 13. Давление топлива во всех полостях форсунки выравнивается.

Площадь управляющего поршня 5 больше площади иглы, по этой причине сила со стороны поршня превышает силу со стороны иглы 8 и она находится в неподвижном закрытом состоянии.

При подаче управляющего сигнала на обмотку электромагнита 1 якорь 3, преодолевая усилие пружины 2, движется вверх, открывая отсечное отверстие 4. Давление в камере управления 13 резко снижается, усилие со стороны иглы 8 превысит усилие со стороны поршня 5 и игла будет двигаться вверх. Топливо из аккумулятора 12 поступает к сопловым отверстиям 9 и в распыленном виде подается в камеру сгорания. Подача топлива за впрыск зависит

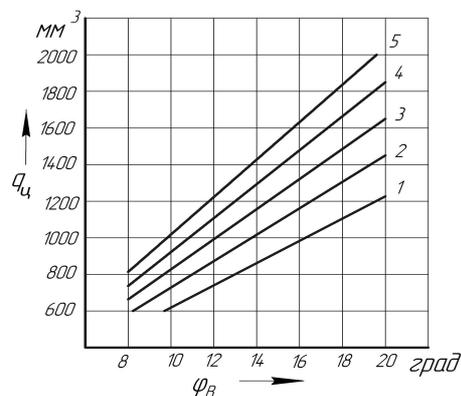


Рис. 5. Номограмма для определения μF в зависимости от q_u и ϕ_B :
1 — 0,6 мм²; 2 — 0,7 мм²; 3 — 0,8 мм²;
4 — 0,9 мм²; 5 — 1 мм²

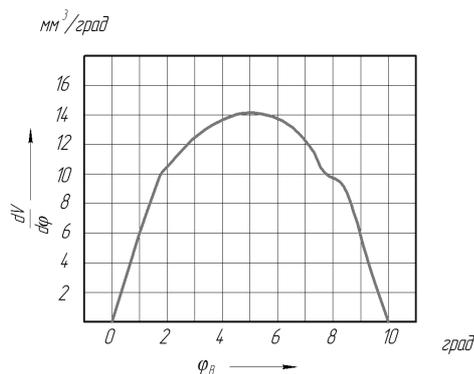


Рис. 6. Дифференциальная характеристика впрыска топлива

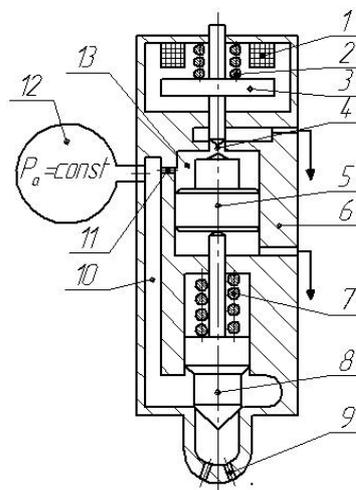


Рис. 7. Форсунка с электромагнитным управлением

от величины давления в аккумуляторе 12, длительности управляющего сигнала в обмотке электромагнита 1 и эффективного проходного сечения распылителя μF .

Оптимальные условия создаются в камере сгорания в результате применения предварительного впрыска топлива. Сгорание небольшой запальной дозы топлива (10–20 % от значения q_u) усиливает подогрев камеры сгорания и повышает в ней турбулентность потока воздуха. Основная порция топлива при последующем впрыске имеет более короткий период задержки воспламенения, сгорает с меньшей жесткостью и токсичностью отработавших газов.

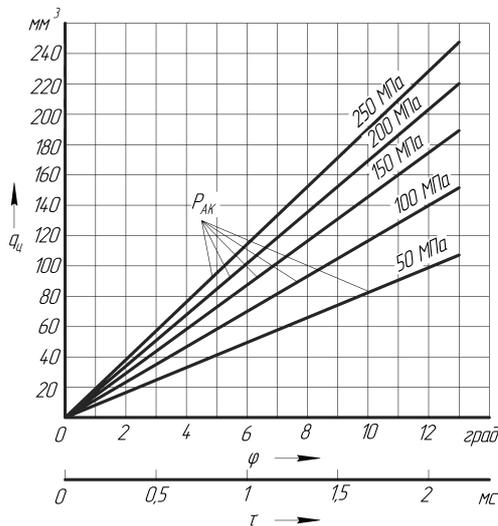


Рис. 8. Зависимость цикловой подачи топлива от давления в аккумуляторе и продолжительности впрыска ($\mu F = 0,15 \text{ мм}^2$, $n_c = 1000$ в минуту)

Объемную теоретическую подачу топлива из распылителя за впрыск (цикловую подачу, мм^3) можно определить по формуле (10), в которой необходимо учитывать величину давления топлива в аккумуляторе.

Выбор величины μF зависит от значения постоянного давления в аккумуляторе, количества фаз впрыска, времени впрыска и подачи топлива в каждой фазе. Предварительный расчет μF для форсунок с электронным управлением выполняется по формулам, приведенным в данной работе.

Время впрыска для продолжительности $\varphi_B = 12^\circ$ и частоте циклов впрыска топлива в минуту $n_c = 1000$ согласно формуле (6) будет равно 0,002 с.

Для однофазного впрыска при $P_{AK} = 100 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ и $\rho_T = 850 \text{ кг/м}^3$ величина $\vartheta_T = 480 \text{ м/с}$. Для $\mu F = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ и времени впрыска 0,002 с количество поданного топлива за впрыск составит $144 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$, или 144 мм^3 . При увеличении времени впрыска до 0,00223 с цикловая подача будет равна 160 мм^3 .

Управлять интенсивностью и формой дифференциальной характеристики впрыска можно величиной давления в аккумуляторе, длительностью и паузами сигнала, поданного на катушку электромагнита.

На рис. 8 показана зависимость величины цикловой подачи от продолжительности впрыска в мс и в градусах и от давления топлива в аккумуляторе (P_{AK}). Диаграмма позволяет для различных величин P_{AK} и времени впрыска определять цикловую подачу при однофазных и многофазных впрысках.

На рис. 9 приведена характеристика с запальной и основной подачей топлива (двухфазная характеристика) аккумуляторной системой с электромагнитным управлением хода иглы форсунки. Площадь под кривой в определенном масштабе представляет собой действительную подачу топлива за цикл (впрыск). Для общей продолжительности впрыска 0,001 с и средней скорости впрыскивания dV/dt , равной $47 \cdot 10^3 \text{ мм}^3/\text{с}$ топливоподача за впрыск составит 47 мм^3 . Необходимая величина запальной и основной порции топлива и интервал между впрысками регулируется электронным блоком управления.

В настоящее время кроме форсунок с электромагнитным управлением хода иглы распылителя применяют форсунки с пьезокварцевым управлением. При подаче высокого напряжения на столбик пластин, изготовленных из природного кварца, его длина

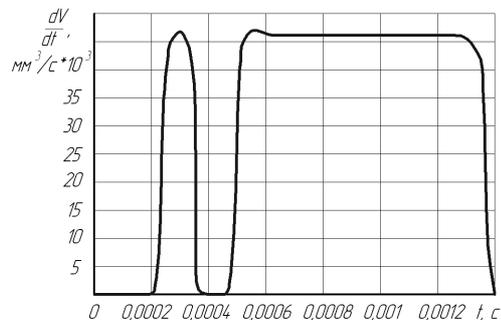


Рис. 9. Дифференциальная характеристика с запальной и основной подачей топлива

изменяется, что позволяет осуществлять несколько подъемов и посадок иглы форсунки за время подачи топлива в камеру сгорания. Принцип работы форсунки с пьезокварцевым управлением не отличается от форсунки с электромагнитным управлением, изображенной на рис. 7.

Выводы.

1. В данной работе приведены методика и номограмма, позволяющие определять эффективное проходное сечение распылителей форсунок с механическим и электронным управлением хода иглы для дизелей с цилиндровой мощностью от 10 до 250 кВт.

2. Для управления процессом подачи топлива необходимо использовать аккумуляторные системы и применять форсунки с электромагнитным или пьезокварцевым управлением, что позволит осуществлять несколько впрысков в процессе подачи топлива в камеру сгорания.

3. Приведена диаграмма, позволяющая для различных величин давления топлива в аккумуляторе и времени впрыска определять цикловую подачу при однофазных и многофазных впрысках.

Библиографический список

1. Трусов, В. И. Форсунки автотракторных дизелей / В. И. Трусов, В. П. Дмитриенко, Г. Д. Масляный. — М.: Машиностроение, 1977. — 167 с.
2. Волкова, Л. Ю. Определение эффективного проходного сечения распылителя дизеля расчетным и экспериментальным путем, его изменение в процессе образования кокса / Л. Ю. Волкова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 3 (133). — С. 117–120.
3. Расчет систем и механизмов двигателей внутреннего сгорания математическими методами: учеб. пособие / Ю. П. Макушев, Т. А. Полякова, Л. Ю. Михайлова [и др.]; под ред. Ю. П. Макушева. — Омск: СиБАДИ, 2011. — 284 с.
4. Системы управления дизельными двигателями: [пер. с нем.] / Ю. Г. Грудский. — 1-е рус. изд. — М.: ЗАО «КЖИ За рулем», 2004. — 480 с.

МАКУШЕВ Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии.

Адрес для переписки: makusev321@mail.ru

ВОЛКОВА Лариса Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Судовые энергетические установки и теплоэнергетика» Калининградского государственного технического университета.

Адрес для переписки: volkova0969@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 19.02.2015 г.

© Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ВЫЖИГАЕМЫМ МОДЕЛЯМ

В статье рассмотрены характерные особенности разработки технологии изготовления литья по выжигаемым моделям (ЛВМ), изготавливаемым по аддитивным технологиям (3d-печатью). Показано, что предварительно проводимый термический анализ при нагреве, в интервале температур технологии ЛВМ, образцов моделей «выращенных» по различным 3d-технологиям позволяет оценить возможность рационального использования этих моделей для ЛВМ, а также способствует выбору известных или разработке новых технологических приемов, рекомендаций для оптимизации технологии на всех стадиях изготовления отливок.

Ключевые слова: литье по выжигаемым моделям (ЛВМ), аддитивные технологии (АТ), «выращивание», 3d-печать объектов, термическое разложение.

Литье по выжигаемым моделям (ЛВМ) достаточно распространяемые в настоящее время способы получения точных, тонкостенных, сложных по конфигурации отливок из различных металлов и сплавов. Условно ЛВМ можно разделить на два направления в зависимости от этапа выжигания модели из литейной формы.

Началом широкого промышленного использования при массовом производстве ЛВМ можно считать 60-е годы прошлого века в связи с расширением исследований и разработкой технологий и оборудования для ЛВМ из пенополистирольных моделей. Отличительной особенностью данных технологических процессов было то, что модели из пенополистирола **газифицировались под действием тепловой энергии металла, заливаемого в литейную форму**, где располагались эти модели. В дальнейшем это направление оформилось как один из способов точного литья — литье по **газифицированным моделям (ЛГМ)** [1].

Изготовление моделей для ЛГМ осуществляется в основном из пенополистирола, обладающего достаточно хорошими для данного способа свойствами: температурой горения ($t_{гор}$) — в пределах 560 °С, время горения — от 10 до 20 с, а масса негазифицируемого остатка доходит до 0,015 % от массы модели. Основные направления улучшения данной технологии это:

- улучшение под воздействием заливаемого металла процесса газификации полистирола, используя специальные добавки;

- снижение дефектов литья, связанных с остатками неполной газификации материала моделей.

Разработки новых материалов, например РММА («Doro Chemical» США) [1], позволили уменьшить остаток по массе в 20 раз, по сравнению с остатком при использовании литейного полистирола.

Для изготовления пенополистирольных моделей применяется оснастка, изготавливаемая как традиционными методами, так и с использованием аддитивных технологий, как при литье по выплавляемым моделям. Это позволяет значительно сократить время подготовки производства. Рациональная, минимальная толщина стенок пенополистирольных моделей, изготавливаемых в пресс-формах, составляет около 2 мм.

Для изготовления тонкостенных, габаритных, сложных по конфигурации отливок, особенно из сложнелегированных сплавов или из сплавов с ограничением в них содержания углерода, представляет интерес другое направление способа литья по выжигаемым моделям. Это способ, **при котором заливка расплавом осуществляется в рабочую полость неразъемной литейной формы, полученную после предварительного выжигания модели** в форме. Керамическая оболочка прокаливается для дожигания остатков моделей, как при литье по выплавляемым моделям, и перед заливкой расплавом подогревается. Для улучшения качества литья заливка оболочки может осуществляться и в вакууме.

Первоначально для изготовления оболочковых форм использовались традиционно изготавливаемые в пресс-формах пенополистирольные модели (Replicast-CS [1]), а с появлением в настоящее время аддитивных технологий (АТ), появилась возмож-

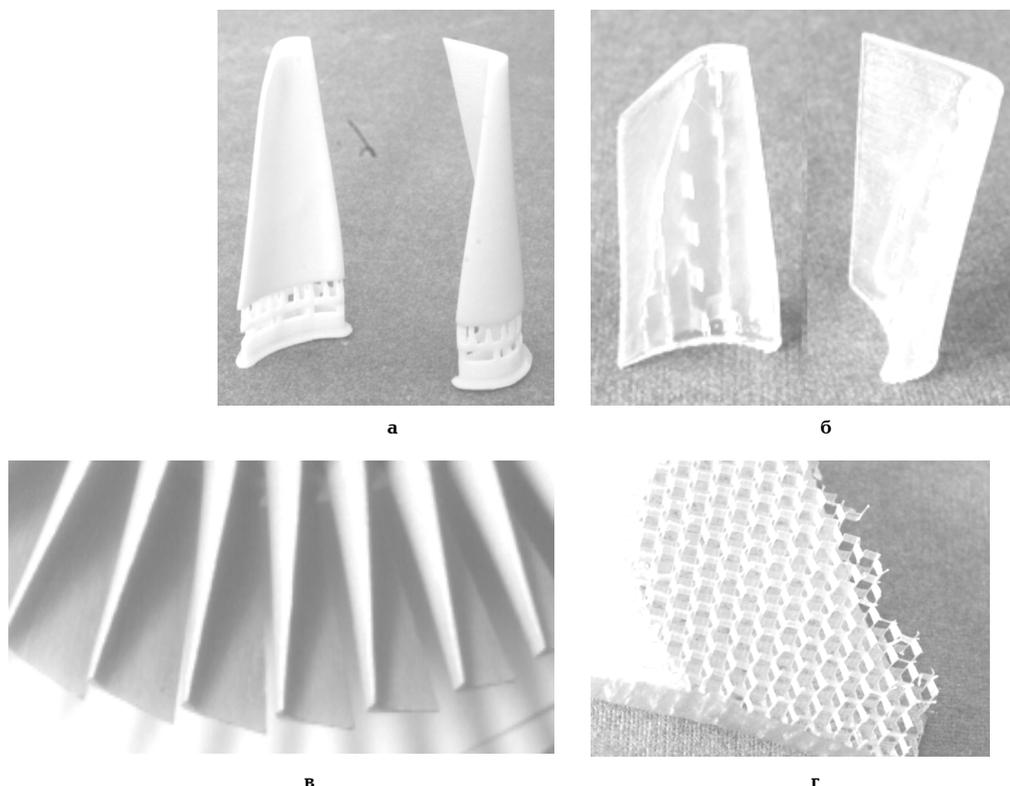


Рис. 1. Образцы объектов, полученных с помощью АТ:
а — лопасть крыльчатки (Z-Builder); **б** — лопасть крыльчатки (iPro 9000 в режиме Quick Cast);
в — лопасти крыльчатки из сплава, изготовленные ЛВМ с использованием АТ (модель);
г — «сотовая» структура объекта, полученного на 3d-принтере iPro 9000

ность использовать «выращенные» выжигаемые модели. Технологии «выращивания» 3d-объектов позволяют изготавливать практически любые сложные по форме, тонкостенные выжигаемые модели с необходимой макроструктурой, конструкционной прочностью для получения качественной оболочки и отливки. Модели, «выращенные» для использования в ЛВМ, могут быть значительно тоньше, чем пенополистирольные, изготавливаемые в пресс-формах, например, модель «лопасти» крыльчатки для изготовления отливки с толщиной до 0,8 мм (рис. 1а, б). В ряде случаев полученные по таким моделям отливки по размерам, шероховатости поверхностей максимально приближаются к деталям и не нуждаются в дальнейшей мехобработке или применяются только финишные операции (рис. 1в). При этом время изготовления моделей на 3d-принтере, с возможностью многократного получения идентичных объектов без всякой оснастки, оценивается в часах.

Получение без оснастки выжигаемых моделей при АТ, по требуемым конструктивным параметрам дает огромный экономический эффект, а применение зарубежных 3d-принтеров различных фирм со своими материалами, неизвестными для использования в ЛВМ, затрудняет разрабатывать или корректировать традиционную технологию литья.

Поэтому была сделана попытка использования известных методик оценки характеристик полученных при разложении материалов в процессе их нагрева, применительно для «выращенных» на 3d-принтерах образцах, в интервале температур полного технологического процесса изготовления ЛВМ.

Аналогично ранее предпринималась попытка [2] по решению технологических задач при ЛВМ с использованием результатов исследований процессов разложения в условиях по термо- и термоокисли-

тельной деструкциях (ТД и ТОД) на материалах, используемых в стереолитографии. Для исследований процессов разложения материалов использовалась модернизированная авторами установка.

В данной работе исследования термического разложения «выращенных» образцов проведены по достаточно широко используемым методикам на приборе DTG-60 SHIMADZU, с отражением динамики потери массы (TGA) при нагревании, изменения температуры в зоне реакции (DTA) и скорости разложения образца (DrTGA) в единицу времени, а также количества зольных остатков после сгорания образцов.

С учетом производственных задач и предварительно выбранных технологий 3d-печати и материалов, были рассмотрены возможности использования для ЛВМ в качестве выжигаемых моделей «выращенные» объекты на 3d-принтерах: Z-Builder с объектами из фотополимера SI500; iPro 9000 с 3d-объектами «выращенными» в режиме Quick Cast из материала Accura Xtreme¹; и на принтере EOSINT P 395 с объектами из полиамида PA-2200.

Материал SI500, используемый при 3d-печати на принтере Z-Builder, представляет собой вязкую эпоксидную композицию желтого цвета. При построении модели на 3d-принтере, проектором создается изображение следующего слоя, под воздействием света смола полимеризуется, создаваемая модель погружается в смолу на толщину слоя, проектором создается изображение следующего слоя и т.д. После «выращивания» и промывания, объект готов к использованию. Объект имеет отличную чистоту поверхности без видимых следов послойного «выращивания» (рис. 1а).

Желтый цвет материалу придает, вероятно, титано-содержащая светорассеивающая добавка, предотвращающая воздействие излучения на более глубо-

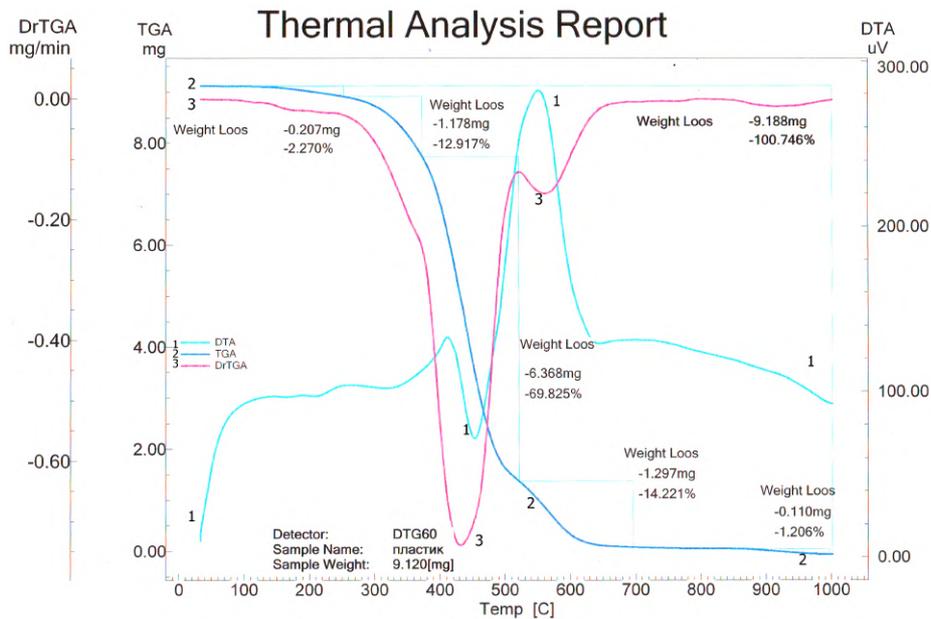


Рис. 2. График изменения DTA, TGA, DdTGA при термическом воздействии на образцы, «выращенные» на принтере Z-Builder из материала SI500

кие слои при «выращивании» модели. После выжигания полимера эта добавка остается в виде мелкодисперсного порошка в количестве, примерно, 0,25 % от исходной массы.

Графики зависимостей TGA, DTA, DdTGA и остатков при термическом разложении (при нагреве) образца из смолы SI500 представлены на рис. 2.

Разложение SI 500 начинается уже при 200 °C. В интервале температур от 200 °C до 450 °C, более 70 % массы исходного материала переходит в газ и удаляется из зоны реакции. Около 500 °C происходит воспламенение оставшейся массы и максимум теплоотдачи наблюдается в районе 550 °C, когда дорагорают тяжелые остатки вещества, составляющие около 20 % массы исходного материала.

Аналогичные графики при термическом разложении «выращенного» на iPro 9000 образца из материала Assuga Xtreme показаны на рис. 3.

«Выращивание» 3d-модели на 3d-принтере iPro 9000 осуществляется в результате послойного нанесения жидкого фотополимера и его полимеризации в том месте, где прошел лазерный луч. При послойном нанесении смолы и обработки лазерным лучом происходит послойное «выращивание» 3d-модели.

Для литья по выжигаемым моделям за рубежом и на ряде отечественных предприятий применяется изготовление моделей в режиме Quick Cast. Модель имеет сотовую структуру (рис. 1г), обеспечивая минимальное образование твердого остатка при выжигании модели из формы, предотвращая деформацию формы и растрескивания при нагреве и прокаливании. Структура позволяет экономично использовать полимер при изготовлении модели. Структура может иметь до 17 % отвержденного полимера и 83 % воздуха. Однако в тонких местах, а также по краям «выращенных» моделей затруднено получение сотовой структуры (рис. 1б).

Разложение материала образцов, полученных на iPro9000, начинается при 100 °C (рис. 3). В интервале температур от 150 °C до 400 °C более 70 % массы исходного вещества переходит в газ и удаляется из зоны реакции. При 400 °C фиксируется максималь-

ная скорость разложения. Около 500 °C продукты распада воспламеняются, и при 550 °C отмечается максимум теплоотдачи процесса разложения и второй максимум скорости разложения.

В сравнении с разложением смолы SI500 все процессы происходят аналогично, за исключением температуры начала разложения (100 °C рис. 3) и тяжелые остатки выгорают в более узком диапазоне температур, создавая большой выброс тепла. После выжигания модели остается около 0,1 % от исходной массы мелкодисперсного порошка.

Полиамид PA 2200 используется при селективном лазерном спекании на 3d-принтере EOSINT P 395. Материал PA 2200 представляет собой порошок со средним размером гранул 56 микрон. Данный способ и материал подходит для «выращивания» без поддержек на поверхностях высокоточных изделий сложной геометрической формы, объекты хорошо поддаются шлифовке и покраске. С помощью селективного спекания порошков лазером послойно «выращивается» модель.

При термическом разложении образцов «выращенных» из полиамида (рис. 4), начало разложения материала отмечается около 250 °C. В интервале температур от 300 °C до 400 °C примерно 50 % массы исходного вещества переходит в газ и удаляется из зоны реакции. При температуре вблизи 450 °C происходит воспламенение остатков разложения. При температуре выше 450 °C тяжелые остатки воспламеняются, и разложение идет с выделением тепла. После термического разложения образца из этого материала остается примерно 0,5 % мелкодисперсного белого порошка, содержащего кремний.

Полученные результаты показывают, что все исследованные материалы при нагреве до 350–400 °C разлагаются аналогично, переходя в газ, теряя более половины массы.

Остатки после разложения этих материалов, используемых для моделей ЛВМ, остаются в рабочей полости форм, в интервале температур, при котором примерно происходит прокалывание форм-оболочек для ЛВМ. Причем масса их значительно больше, чем

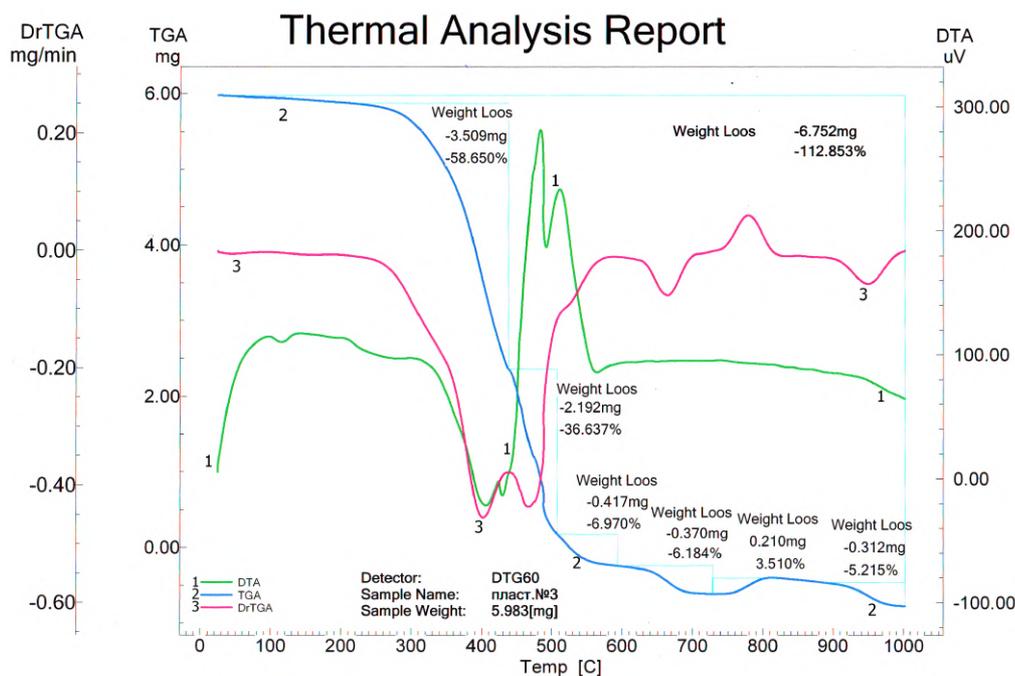


Рис. 3. График изменения DTA, TGA, DrTGA при термическом воздействии на образцы, «выращенные» в режиме Quick Cast из материала Accura Xtreme на принтере iPro 9000

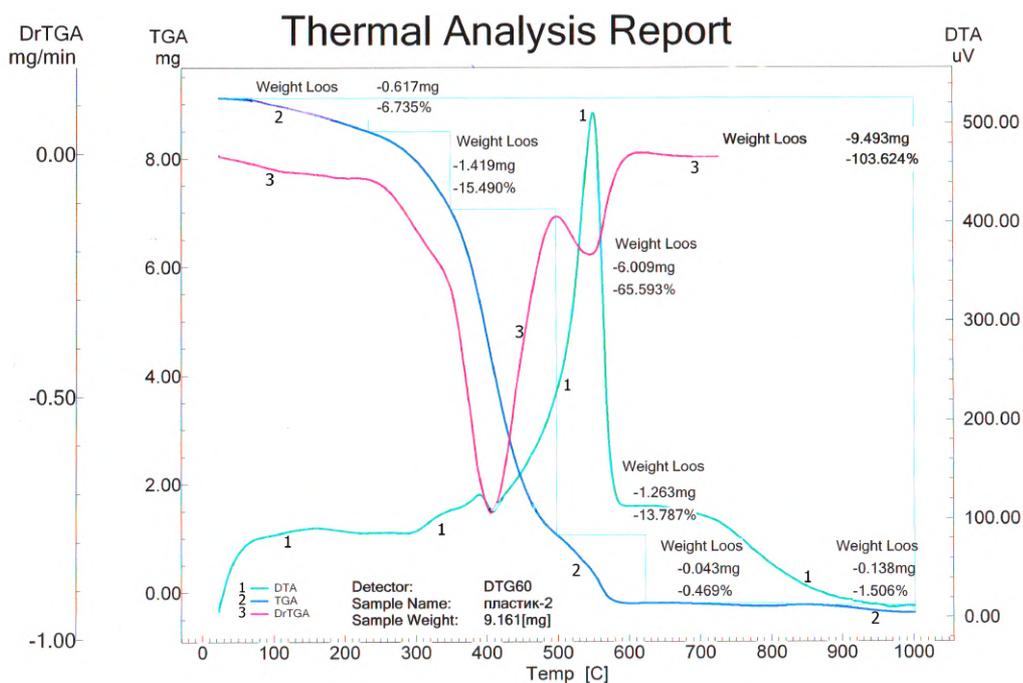


Рис. 4. График изменения DTA, TGA, DrTGA при термическом воздействии на образцы, «выращенные» из полиамида PA2200 на принтере EOSINT P 395

отмечено в исследованиях при ЛГМ с полистирольными моделями [1]. Для удаления из рабочей полости формы таких остатков предусматривается наличие «промывников» или специальных «карманов», обеспечивающих удаление твердых остатков разложения из зоны формирования тела отливки в процессе заполнения расплавленным металлом формы или при продувке формы воздухом. В связи с этим при разработке 3D-CAD на выжигаемую модель необходимо стремиться облегчить модель (использовать тонкие стенки, а для повышения их жесткости — создавать

сложную архитектуру внутренней части моделей, формировать систему вспомогательных «поддержек»). При «выращивании» модели это не усложняет процесс изготовления объекта. Необходимо по возможности выбирать технологический процесс 3d-печати выжигаемой модели, обеспечивающий получение сотовой структуры объекта, как при печати в режиме Quick Cast на iPro 9000.

В связи с отсутствием для технологов практических рекомендаций по разработке технологий ЛВМ с использованием моделей АТ для изготовления

можно воспользоваться сведениями, полученными из предварительных экспериментов по температурному разложению образцов «выращенных» по предлагаемой технологии получения выжигаемых моделей. Возможно проведение экспериментов на образцах с учетом предполагаемых толщин стенок моделей и других особенностей моделей. Сведения по термическому разложению образцов получают за короткий промежуток времени.

При разработке литейной технологии необходимо учесть, что оболочка — литейная форма, в которой располагается выжигаемая модель, препятствует доступу воздуха и выходу продуктов разложения при нагреве снаружи формы с моделью для её выжигания и прокаливания формы. Неконтролируемое повышение давления газов может привести к деформации и даже к разрушению формы. Аналогичен может быть эффект при нагреве модели внутри формы, если отсутствуют вентиляционные (продувочные) каналы.

Удаление продуктов разложения моделей может быть осуществлено, если предусмотреть в 3D-CAD специальные продувочные каналы внутри модели и выходные каналы в литейной форме-оболочке. Последние могут быть добавлены на отпечатанную модель перед изготовлением оболочки и могут быть выполнены из воска, парафино-стеариновой смеси и т.п. смесей, имеющих более низкую температуру плавления, чем материал модели. Аналогично выполняются элементы литниковой системы (стояки, приливы, шлакоуловители и т.п.) для уменьшения материала, используемого при 3d-печати. Технологический прием создания комбинированных моделей из различных по температуре плавления материалов, расширяет возможности использования моделей, изготовленных по АТ, а также снижает себестоимость выжигаемых моделей. При сушке формы, смеси вытапливаются, образуются технологические каналы, литниковая система и т.п. Продувая через эти каналы воздух при температуре 350–400 °С, можно удалить 50–70 % массы материала модели. Нагрев изнутри и малая теплопроводность полимера модели исключают образование зон скопления газа и, следовательно, деформацию и разрушение литейной формы. Повышение температуры, не прекращая подачу воздуха, будет способствовать выжиганию тяжелых остатков и предотвращению сажевых отложений на стенках рабочих поверхностей оболочки. Такой прием позволит удалить и мелкодисперсные остатки моделей. Результаты изменения ДТА, ТГА, D_rTGA, полученные в предварительных экспериментах при термическом разложении образцов, будут способствовать разработке рациональной технологии литья по ЛВМ.

Преимущества аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям достигаются за счет воз-

можности многократного изготовления высокоточных моделей за относительно короткий промежуток времени, исключив значительные затраты на оснастку, а также за счет использования опыта традиционных технологий изготовления форм-оболочек, пополняя опыт изготовления ЛВМ особыми технологическими приемами при использовании моделей, изготовленных на 3d-принтерах, АТ способствуют развитию ЛВМ для получения точных и сложных по конфигурации отливок из специальных сплавов, значительно улучшая экономические показатели точного литья.

Предварительное использование методики исследования термического разложения любых «выращенных» объектов, предполагаемых для применения в качестве выжигаемых моделей при ЛВМ, позволит решить вопрос о целесообразности применения данного способа и материала для изготовления выжигаемых моделей, а также позволит предусмотреть известные в литье технологические приемы и особенности построения рациональных технологий ЛВМ для отдельных видов отливок.

Примечания

¹ Работа проводилась в НТК «МашТех», СПб ГПУ.

Библиографический список

1. Шуляк, В. С. Литье по газифицируемым моделям / В. С. Шуляк. — СПб. : НПО Профessional, 2007. — 408 с.
2. Морозов, В. В. Исследование и разработка технологических режимов изготовления отливок по выжигаемым моделям, полученных методом лазерной стереолитографии : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Морозов. — М., 2005. — 15 с.

МИТРАКОВ Геннадий Николаевич, кандидат технических наук, директор инженерного центра технологий, оборудования, материалов при Омском государственном техническом университете (ОмГТУ).

ЕВДОКИМОВ Сергей Николаевич, инженер института проблем переработки углеводородов СО РАН.

ЛАВРИК Евгений Геннадьевич, кандидат технических наук, главный металлург ОАО «Омское мотороконструкторское бюро».

САЗОНОВ Виктор Сергеевич, инженер инженерного центра технологий, оборудования, материалов при ОмГТУ, аспирант ОмГТУ.

Адрес для переписки: iztom@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.04.2015 г.

© Г. Н. Митраков, С. Н. Евдокимов, Е. Г. Лаврик, В. С. Сазонов

Книжная полка

Величко, В. В. Модели и методы повышения живучести современных систем связи / В. В. Величко, Г. В. Попков, В. К. Попков. — М. : Горячая линия-Телеком, 2014. — 269 с. — ISBN 978-5-9912-0408-8.

Рассмотрены вопросы анализа живучести сетей связи в условиях разрушающих информационных воздействий. Дана классификация информационных атак в информационных сетях и методы их обнаружения. Уделено значительное внимание вопросам, связанным с живучестью и надёжностью мобильных систем связи, предложены модели структурной надёжности.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье рассмотрены возможности повышения использования точного литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) в результате применения аддитивных технологий, для значительного сокращения времени подготовки производства и повышения качества отливок при ЛВМ, путем применения 3d-печати неметаллических материалов в процессе изготовления оснастки.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям (ЛВМ), аддитивные технологии (АТ), «выращивание», 3d-печать объектов.

К сожалению, в настоящее время в машиностроении наблюдается тенденция снижения использования традиционных методов точного литья при получении заготовок для сложных по конфигурации изделий. Это связано, прежде всего, с распространением при получении сложных по форме деталей новых технологий по мехобработке на высокоскоростных обрабатывающих центрах, с одновременной обработкой простых заготовок в различных плоскостях, а также с расширением внедрения новых технологий и оборудования по плазменным, лазерным и гидроабразивным способам резки и обработки, и получение уже точных и сложных по конфигурации 3d-изделий.

Несмотря на огромный при этом технический эффект по производительности, в большинстве случаев эти способы приводят к очень низкому коэффициенту использования материалов (КИМ) и низким показателям по энерго- и ресурсосбережению при изготовлении фасонных, сложных по геометрии, разностенных 3d-изделий. КИМ может достигать до 0,10–0,15. Получается эффект перевода габаритных заготовок (слитков, различного вида проката и т.п.) в стружку, обрезь для получения разностенных, сложных по конфигурации изделий. Наиболее заметно этот «экономический эффект» наблюдается на таких изделиях, которые изготавливаются из высоколегированных черных и цветных сплавов, дорогих материалов (металлов, неметаллов).

Снижение использования ЛВМ для получения точных заготовок связано, в первую очередь, с очень большими затратами и временем на подготовку производства при изготовлении оснастки. При этом теряется значительный экономический эффект от появления и продвижения промышленной продукции на рынке, с переводом на её массовое производство. Теряется эффект «источника ценообразования продукции».

Одним из способов сохранения преимуществ использования ЛВМ для получения точных загото-

вок, а также для обеспечения возможности быстрой материализации оснастки, не реализуемой в рамках классической мехобработки, является включение в процесс изготовления точных отливок совершенно новых, так называемых «аддитивных технологий» [1].

Аддитивные технологии (АТ) — это технологии, направленные на получение 3-мерных физических объектов, путем **локального добавления («выращивания»)** веществ (элементов) с различными свойствами и характеристиками по определенным закономерностям пространственного построения этих объектов. Целью использования АТ, в конечном итоге, является «выращивание» готовых изделий с определенной конфигурацией, характеристиками и функциональными свойствами, значительно сокращая период их производства. Однако в настоящее время осуществить равноценную замену металлических объектов, полученных точным литьем на готовые изделия, полученные АТ, нереально. Это связано с огромным опытом использования отливок с известными функциональными свойствами материалов и изделий, испытанными в процессе эксплуатации механизмов, машин и оборудования (чаще всего с многолетним периодом).

Поэтому значительный эффект использования АТ может быть достигнут в настоящее время за счет сокращения времени и упрощения подготовки производства на этапе изготовления оснастки для ЛВМ.

Использование пластмассы для изготовления литейной оснастки осуществляется давно [2]. При очень тщательном изготовлении мастер-модели, а оснастки — с помощью литья, возможно полностью исключить мехобработку рабочей поверхности формы. Но недостатком использования оснастки из пластмассы для ЛВМ является её низкая теплопроводность (особенно без металлического наполнителя) и, соответственно, низкая скорость охлаждения модельной массы в пресс-форме, в связи с этим появляются дефекты на застывших моделях для ЛВМ [3].

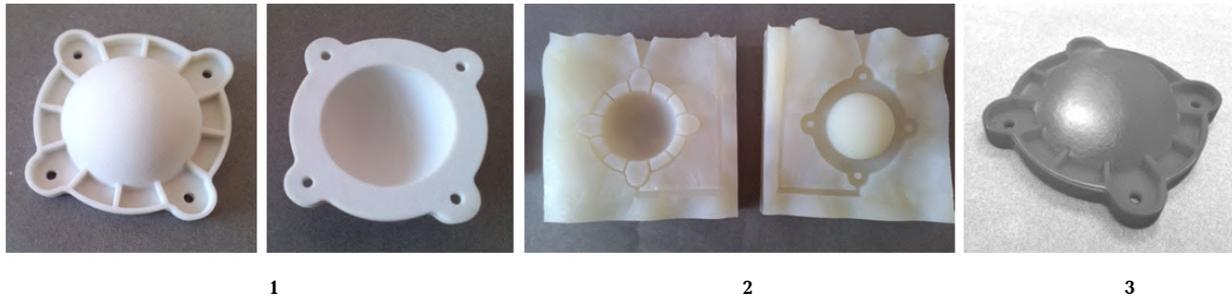


Рис. 1. Получение оснастки для изготовления моделей по технологии ЛВМ через мастер-модель, полученную по АТ:
 1 — мастер-модель, изготовленная на 3d-принтере (Z-450) из композитного материала, для технологии ЛВМ;
 2 — литейная форма из пентозласта для изготовления моделей для технологии ЛВМ;
 3 — модель из модельной массы для технологии ЛВМ

Использование 3d-печати при изготовлении пластмассовых пресс-форм для ЛВМ позволили уменьшить или даже исключить многие недостатки в технологии изготовления оснастки:

— изготовление мастер-модели (на принтере Z-450) и «выращивание» функциональной рабочей поверхности пресс-формы из фотополимера SI 500 (на принтере Z-Builder) позволило значительно облегчить изготовление мастер-модели и рабочей поверхности формы и обеспечить точность в пределах 0,1 мм и 0,05 мм соответственно;

— аддитивные технологии позволили в десятки раз сократить время изготовления. Скорость «выращивания» на указанных 3d-принтерах: мастер-модели и пресс-формы составляет (по оси Z) 23 мм/час и 12 мм/час соответственно;

— при изготовлении моделей для ЛВМ в пентозластовых пресс-формах [4], полученных через мастер-модель, отпечатанную на 3d-принтере (рис. 1), время затвердевания модельной массы будет достаточно продолжительное. Несмотря на то, что способ изготовления моделей для ЛВМ непроизводителен, время можно уменьшить, добавляя в пентозласт дисперсные металлические порошки. Однако способ прост и при мелкосерийно и опытном производстве достаточно сложная, но точная модель с литниковой системой и отливка из металла и даже партия отливок может быть получена в течение нескольких часов, независимо от сложности отливки. Данный способ может быть также использован для отработки технологии получения точных и качественных отливок при подготовке оснастки для массового производства отливок.

Время изготовления оснастки в основном будет зависеть от скорости «выращивания» мастер-модели по оси Z (характеристика оборудования) и времени полимеризации выбранных для оснастки смол.

При выращивании сразу функциональной рабочей поверхности и полностью пресс-формы из фотополимера (например, на 3d-принтере Z-Builder), мы можем получить очень тонкостенную (1,5–3 мм) форму (для повышения скорости охлаждения модельной массы в её полости) с «выращенным» одновременно с ней упрочняющим, жестким, пространственно-разветвленным (заранее заложенным в 3d-CAD модель в зависимости от желания конструктора) каркасом на наружной поверхности оснастки (рис. 2). Аналогично, как и в первом случае, скорость получения готовой формы, не требующей какой-либо механической обработки на рабочей поверхности, с любой сложностью рабочей поверхности оснастки, зависит только от технических параметров 3d-принтеров (скорость «выращивания» 3d-объектов по оси Z).

При этом «поддержка», необходимая при «выращивании» объекта на наружной поверхности пресс-формы, может не удаляться.

Модели из модельной массы для ЛВМ очень легко извлекаются из пресс-формы, выполненной из фотополимерной смолы SI500 (для Z-Builder). Причем следов послойного «выращивания» рабочей поверхности пресс-формы на данном принтере не наблюдается. Чистота поверхности и формы, и модели отличная.

В результате использования некоторых технологических приемов для ускорения охлаждения таких тонкостенных пресс-форм удалось довести время затвердевания модельной массы (с условным диаметром модели в пределах 50–60 мм) до 5–7 мин.

Технологические особенности подготовки производства с АТ для изготовления отливок методом ЛВМ следующие:

1. Подготовка 3d-CAD модели оснастки, с литниковой системой, с центрирующими элементами полуформ и с другими вспомогательными элементами, необходимыми для оснастки по чертежу детали или отливки, используя конструкторские программы: AutoCAD, Solid Works, Компас 3D и заложенные в них средства САПР [5].

2. Предусмотреть необходимость разбивки прототипа 3d-CAD модели на части с учетом размеров рабочих столов 3d-принтеров, расположения соединительного шва на рабочей поверхности пресс-формы, с наиболее удобными местами для зачистки и обработки (при необходимости), а также предусмотреть при 3d-печати центрирующие элементы, облегчающие позиционирование частей габаритного 3d-объекта при сборке (склейка).

3. Точность построения 3d-CAD определяется минимальным размером элемента на рабочей поверхности пресс-формы, шероховатостью поверхности и погрешностью размеров формы с учетом усадки в процессе 3d-печати, что закладывается в исходной 3d-CAD, а также зависит от технических возможностей 3d-принтера.

4. Определяется пространственная геометрия частей пресс-формы с учетом минимально допустимой толщины стенки, протяженностью элементов заданного сечения пресс-формы для создания системы жесткости и упрочнения пресс-формы с её наружной стороны. Это необходимо для обеспечения конструктивной прочности пресс-формы при запрессовке модельной массы и в тоже время для достижения рациональных теплофизических показателей на этапе формирования модели для ЛВМ. Форма из пластика должна быть максимально тонкой (1,5–3,0 мм), но конструкция формы должна выдерживать все рабочие нагрузки на оснастку.

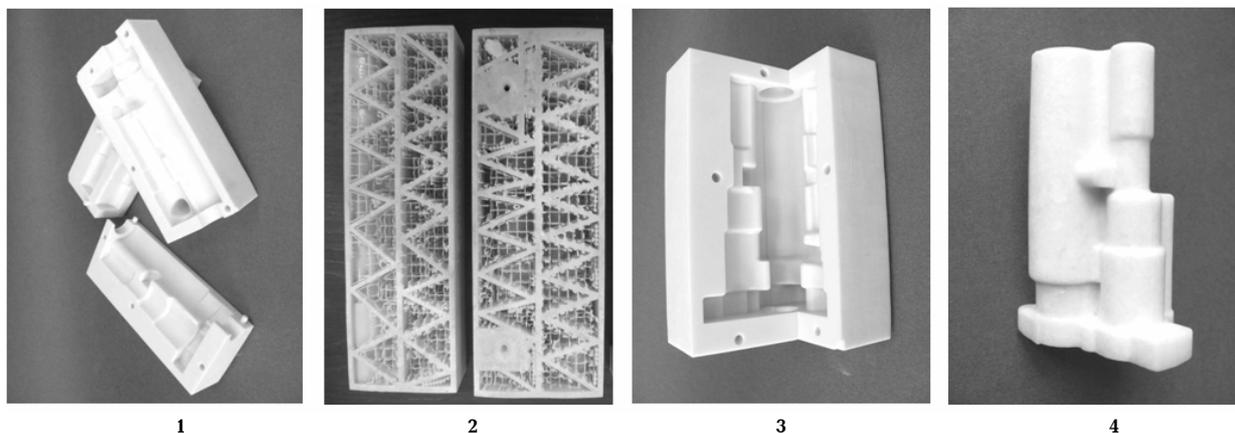


Рис. 2. Получение рабочей поверхности пресс-формы и пресс-формы по аддитивным технологиям из фотополимеров (Z-Builder) для получения оснастки ЛВМ:

- 1 — части полуформы для изготовления моделей ЛВМ;
 2 — наружная поверхность пресс-формы с упрочняющим каркасом;
 3 — пресс-форма (частично собранная); 4 — модель для ЛВМ

В 3d-CAD предусматриваются все необходимые отверстия с усиливающими элементами или отдельно элементы, где должно быть отверстие (например, для запрессовки и т.п.), исключающие деформацию стенок пресс-формы при заполнении пресс-формы модельной массой, а также закладываются элементы, необходимые для разборки формы.

5. При проектировании рабочей поверхности пресс-формы учитывается все виды усадки (свободная и затрудненная) и их величины при полном технологическом цикле изготовления моделей и отливок. Однако чаще всего, при необходимости получения очень точных отливок или для изготовления оснастки для массового производства моделей и отливок, корректировка этих величин осуществляется при повторном «выращивании» оснастки с учетом опробования её в первоначальном варианте.

6. При доработке наружной поверхности пресс-формы при создании 3d-CAD используется параллельный перенос опорных элементов рабочей поверхности оснастки (зеркального отображения рабочей поверхности) с последующей сшивкой, что позволяет получить сразу при 3d-печати с незначительной толщиной сложную, но равностенную форму.

В настоящий момент практически в каждой системе САПР предусмотрен целый набор средств и инструментов построения 3d-CAD модели пресс-форм на основе имеющегося чертежа детали, включающего анализ уклонов модели отливок, определение линий разъема, построения отсекающих поверхностей для проектирования стержней и вставок в оснастках для отливок, имеющих отверстия, а также построения 3d-CAD формы на основе поверхности раздела и инструментов разделения и т.п. Однако в большинстве случаев, сейчас пока при проектировании большая часть вопросов решается чисто эмпирически, в результате накопленного опыта по технологии ЛВМ и проектирования оснастки.

Использование аддитивных технологий в технологии получения отливок ЛВМ, по сравнению с традиционными технологиями ЛВМ, позволяет значительно сократить процесс подготовки производства, осуществить с достаточно низкими затратами достижение необходимой точности и шероховатости поверхности моделей и отливок, исправить ошибки или неточности, допущенные на этапе проектирования

технологии и оснастки, а высокая скорость «выращивания» пресс-формы и мастер-модели даёт возможность, в конечном итоге, не только использовать все преимущества АТ в мелкосерийном и экспериментальном производстве, но и значительно ускорить внедрение ЛВМ для конкретного литья в массовое производство, с учетом сокращения времени на отработку технологий и изготовления, уже необходимой для массового производства, оснастки.

Библиографический список

- ГОСТ 19505-86. Модели литейные и ящики стержневые пластмассовые. Технические требования. — Взамен ГОСТ 19505-74 ; введ. 1987-06-30. — М. : Изд-во стандартов, 1986. — 10 с.
- Зленко, М. Аддитивные технологии в опытно литейном производстве. Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм [Электронный ресурс] / М. Зленко, П. Забеднов. — Режим доступа : http://ksystec.ru/download/additiv_tech.pdf (дата обращения: 14.04.2015).
- Литье по выплавляемым моделям : моногр. / С. А. Казеннов [и др.] ; под ред. Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1971. — 436 с.
- Резина для изготовления форм ювелирных изделий [Электронный ресурс] // Ювелирные технологии . — Режим доступа : <http://jtech.com.ua/article/view/id/371> (дата обращения: 14.04.2015).
- Использование поверхностей разъема в SolidWorks [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://xgu.ru/wiki/Использование_поверхностей_разъема_в_SolidWorks (дата обращения: 14.04.2015).

МИТРАКОВ Геннадий Николаевич, кандидат технических наук, директор инженерного центра технологий, оборудования, материалов (ИЦТОМ).

САЗОНОВ Виктор Сергеевич, инженер ИЦТОМ, аспирант.

ПОЛЯКОВА Алёна Викторовна, инженер ИЦТОМ, магистрант.

АНИКИН Иван Сергеевич, инженер ИЦТОМ, магистрант.

Адрес для переписки: iztom@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.04.2015 г.

© Г. Н. Митраков, В. С. Сазонов, А. В. Полякова, И. С. Аникин