

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 655.344:667.64

**Л. Г. ВАРЕПО
А. Ю. БРАЖНИКОВ**

Омский государственный
технический университет
ООО «Омскбланкиздат»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМУЛЬГИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КРАСКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ИЗОПРОПИЛОВОГО СПИРТА В УВЛАЖНЯЮЩЕМ РАСТВОРЕ

В статье приводятся научные результаты экспериментальных исследований влияния содержания изопропилового спирта в увлажняющем растворе на способность офсетных печатных красок к эмульгированию. Изучена кинетика процесса эмульгирования офсетных красок производителей FlintGroup (Германия), SunChemical (Германия).

Ключевые слова: плоская офсетная печать, увлажняющий раствор, эмульгирование краски.

Постановка задачи. Исследование составов, режимов подачи увлажняющего раствора и его влияния на качество печати остается по-прежнему актуальной задачей, поскольку стабильность процесса офсетной печати основывается на избирательном смачивании пробельных элементов увлажняющим раствором, а печатающих элементов — краской [1–3].

В процессе формирования печатной эмульсии в красочном аппарате увлажняющий раствор с более низкой температурой соединяется с офсетной краской, которая имеет более высокую температуру. Можно предположить, что процент содержания изопропилового спирта (ИПС) в эмульсии будет величиной непостоянной, степень испарения его

из печатной эмульсии может меняться в процессе повышения или понижения температуры. А значит, будет оказывать влияние на процесс эмульгирования и дестабилизирующее воздействие на печатный процесс [4, 5].

В последние годы за рубежом прослеживается тенденция отказа от введения изопропилового спирта в увлажняющий раствор в процессе офсетной печати, приобретающая все большую актуальность [3]. Однако благодаря ряду своих неоспоримых нижеперечисленных преимуществ и весьма существенному у нас в стране парку листовых офсетных машин со спиртовым увлажнением он до сих пор продолжает использоваться:

- позволяет снизить поверхностное натяжение, улучшая смачивание печатной пластины меньшим слоем увлажняющего раствора;
- снижает электропроводность раствора;
- повышает вязкость раствора и увеличивает скорость переноса увлажняющего раствора на печатную форму, тем самым повышается способность воды смачивать пробельные элементы печатной формы [3].

Стабильность содержания ИПС зависит от ряда факторов. Отклонение его от нормируемого значения приводит к повышенному эмульгированию печатной краски с увлажняющим раствором. В свою очередь эмульгирование краски приводит к образованию дефектов: снижение интенсивности цвета, возникновение полос и разводов на оттиске.

Цель работы — исследовать способность красок для офсетных печатных машин со спиртовым увлажнением к эмульгированию при изменении содержания ИПС в увлажняющем растворе.

Объекты и методы исследования. В эксперименте применяли краски LitoFlora FTX производителя FlintGroup и Cristal производителя Sun Chemical — офсетные краски растительного происхождения, предназначенные для печати по мелованным глянцевым, матовым, а также натуральным сортам бумаги и картона на многокрасочных машинах со спиртовыми и традиционными системами увлажнения.

Для получения увлажняющего раствора применялся концентрат Hydrofast 307 GS, который стабильно поддерживает кислотность увлажняющего раствора в пределах значений $PH=4,8-5,3$. В качестве спиртовой добавки использовался изопропиловый спирт, имеющий следующие характеристики: степень химической чистоты продукта: 99,7–99,9 %, плотность при 25°C — 0,7847–0,7852 г/см, сухой остаток — не более 0,0005 %, содержание ацетона — 0,03 %, испарение быстрое и полное.

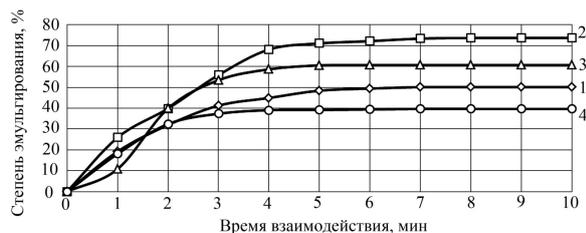


Рис. 1. Кинетические кривые эмульгирования офсетной краски LitoFlora FTX при концентрации ИПС 10 % (1 — black, 2 — cyan, 3 — magenta, 4 — yellow)

Для определения степени эмульгирования печатных красок при взаимодействии с увлажняющим раствором применялся метод [6–7], в соответствии с которым процент захвата краски определяется путем вычитания начальной массы краски от эмульгированной красочной массы с течением определенного отрезка времени. По найденным значениям степени эмульгирования были построены соответствующие кинетические зависимости.

Концентрацию ИПС в увлажняющем растворе не повышали выше 15 %, поскольку дальнейшее ее повышение существенно не меняет поверхностное натяжение раствора.

В эксперименте применяли 4 серии увлажняющего раствора:

1. $PH=5,1$, электропроводность = 1081 μS , концентрация ИПС = 0 %;
2. $PH=5,0$, электропроводность = 980 μS , концентрация ИПС = 5 %;
3. $PH=5,2$, электропроводность 808 μS , концентрация ИПС = 10 %;
4. $PH=4,87$, электропроводность 1067 μS , концентрация ИПС = 15 %.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Кинетические кривые, представленные на рис. 1–2, построены по экспериментальным данным в виде зависимости степени эмульгирования, соответствующей равновесному содержанию увлажняющего раствора в печатной краске от времени взаимодействия. Как следует из зависимостей, представленных на рис. 1–2, вид кинетических кривых эмульгирования ПК LitoFlora FTX соответствует виду идеальной краски типа С по методике [6]. Величина эмульгирования снижается с увеличением концентрации спирта, что подтверждает результаты исследований [5]. Максимальное повышение процента захвата краской увлажняющего раствора составляет 5,3 %, максимальное увеличение СЭ — 6 %, при взаимодействии 10 минут (это разница между процентом захвата увлажняющего раствора краской при отсутствии спирта и процентом захвата увлажняющего раствора при концентрации в 15 %). Причем разница процента захвата увлажняющего раствора испытуемой краской между 0 и 5 %, 5 и 10 %, 10 и 15 %, не превышает 3 %.

Полученные данные показали, что печатная краска SunChemical Cristal имеет среднее повышение процента захвата краской увлажняющего раствора и составляет 35,2 %, максимальная разница СЭ — 64,35 % при взаимодействии 10 минут (это разница между процентом захвата увлажняющего раствора краской при отсутствии спирта и процентом захвата

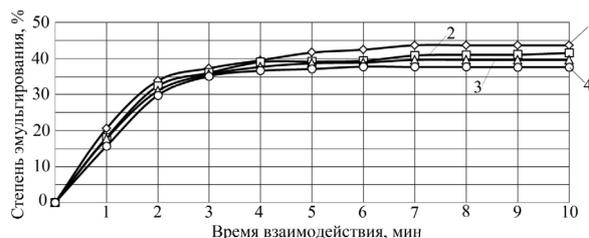


Рис. 2. Зависимость Δ степени эмульгирования краски LitoFlora FTX (yellow) от концентрации ИПС в увлажняющем растворе: 1 — концентрация 0 %, 2 — концентрация 5 %, 3 — концентрация 10 %, 4 — концентрация 15 %

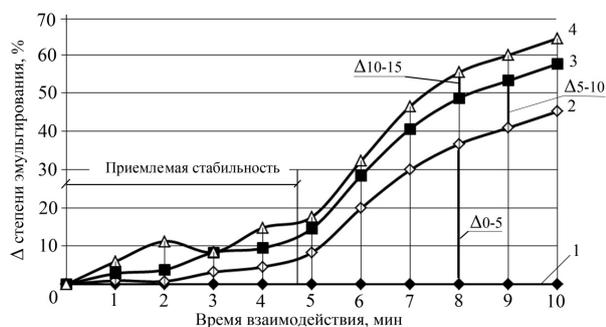


Рис. 3. Зависимость Δ степени эмульгирования краски Cristal от концентрации ИПС в увлажняющем растворе:
1 — концентрация 0 %, 2 — концентрация 5 %, 3 — концентрация 10 %, 4 — концентрация 15 %

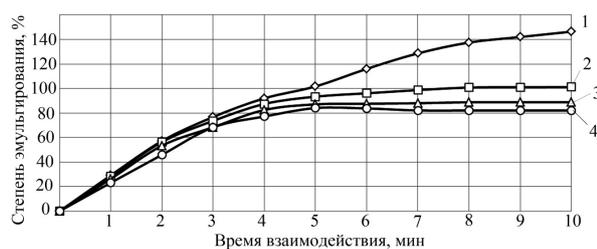


Рис. 4. Зависимость Δ степени эмульгирования краски Cristal (black) от концентрации ИПС в увлажняющем растворе:
1 — концентрация 0 %, 2 — концентрация 5 %, 3 — концентрация 10 %, 4 — концентрация 15 %

увлажняющего раствора при концентрации в 15 %). Разница процента захвата увлажняющего раствора испытуемой краской между 0 и 5 % в среднем составляет 21,2 % (max=45 % при 10 мин), между 5 и 10 % — 8,6 % (max=12,4 % при 10 мин), между 10 и 15 % — средняя разница СЭ составляет 5,4 % (max=6,7 % при 10 мин) (рис. 3).

Анализ экспериментальных данных показал:

— при отсутствии спирта в увлажняющем растворе кинетическая кривая эмульгирования краски SunChemical Cristal принимает вид кривой типа В по методике [6], что соответствует «неидеальной» краске (рис. 4);

— при концентрации спирта в увлажняющем растворе в интервале от 0 до 5 % в процессе печатания краска SunChemical Cristal нестабильна (рис. 3);

— в интервале концентрации ИПС от 10 до 15 % наблюдаются наименьшие колебания степени эмульгирования краски SunChemical Cristal (рис. 3);

— степень эмульгирования печатной краски LitoFlora FTX при любой концентрации ИПС в пороге 15 % сохраняется стабильной (рис. 5).

Анализ характера кинетических кривых испытуемых красок (рис. 4, 6) показывает, что стабильность краски LitoFlora FTX по отношению к SunChemical Cristal выше.

Следовательно, краска LitoFlora FTX более стабильна в процессе печати при колебаниях концентрации спирта в увлажняющем растворе и в эмульсионной красочной массе. Краска SunChemical Cristal пригодна для печати, но требует повышенного контроля со стороны печатника.

При небольших объемах краскосяема в процессе печати существует риск повышенно-

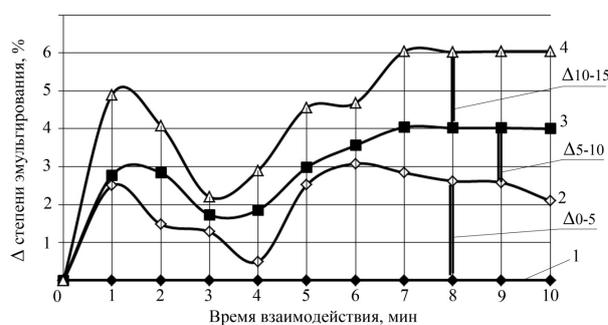


Рис. 5. Зависимость Δ степени эмульгирования краски LitoFlora FTX от концентрации ИПС в увлажняющем растворе:
1 — концентрация 0 %, 2 — концентрация 5 %, 3 — концентрация 10 %, 4 — концентрация 15 %

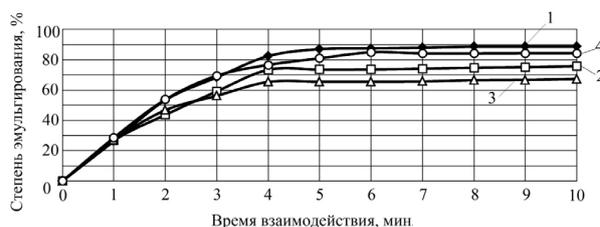


Рис. 6. Кинетические кривые эмульгирования офсетной краски Cristal при концентрации ИПС 10 %
(1 — black, 2 — cyan, 3 — magenta, 4 — yellow)

го эмульгирования краски в красочном аппарате, а также увеличения листопрогона при выходе печатной машины на цвет.

Результаты исследования влияния содержания изопропилового спирта на эмульгирующую способность печатных красок для листовых офсетных машин позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Печатная краска SunChemical Cristal в интервале от 0 до 5 % ИПС в УР уменьшает степень насыщения на 21,2%, в интервале от 5 до 10 % — уменьшает степень насыщения на 8,6 %, в интервале от 10 до 15 % снижение составляет 5,4 %.

2. Общее изменение предела насыщения в интервале концентрации от 0 до 15 % ИПС в УР составляет 35,2 %.

Такой характер изменения степени эмульгирования показывает, что краска SunChemical Cristal сохраняет умеренную стабильность при концентрациях ИПС на уровне 10–15 %.

3. Печатная краска LitoFlora FTX в интервале от 0 до 5 % ИПС в УР уменьшает степень насыщения на 2,4 %, в интервале от 5 до 10 % уменьшает степень насыщения на 1,14 %, в интервале от 10 до 15 % снижение составляет 1,73 %.

4. Общее изменение предела насыщения в интервале концентрации от 0 до 15 % ИПС в увлажняющем растворе составляет 5,3 %.

Колебания процента содержания спирта в увлажняющем растворе в указанном интервале и в красочной эмульсии не будут оказывать дестабилизирующего влияния на печатно-технические свойства краски LitoFlora FTX производства FlintGroup.

5. Наименьшие колебания СЭ наблюдаются при концентрации ИПС — от 5 до 10 %.

Библиографический список

1. Бозоян, М. А. Влияние режимов подачи увлажняющего раствора на цветовые характеристики оттисков в листовой офсетной печати / М. А. Бозоян, Н. А. Нечипоренко // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2015. — № 3. — С. 14–22.
2. Бозоян, М. А. Влияние режимов подачи увлажняющего раствора на оптические и градационные характеристики оттиска в листовой офсетной печати / М. А. Бозоян, Н. А. Нечипоренко // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2015. — № 3. — С. 3–13.
3. Емельянова, Т. Увлажнение в офсетной печати // Полиграфист и Издатель. — 2002. — № 10. — С. 10–14.
4. Марогулова, Н. Н. Расходные материалы для офсетной печати / Н. Н. Марогулова, С. И. Стефанов. — М.: Русский университет, 2002. — 240 с.
5. Boonkuernoor, N. A Study to determine the relationship between emulsification and tack of offset lithographic inks // Naruchart Boonkuernoor. — Rochester Institute of Technology: RIT Scholar Works. — 1994. — 147 p.

6. Surland, A. Factors Determining the Efficiency of Lithographic Inks, TAGA Proceedings. — 1983. — p. 191–233.

7. Серова, В. Н. Сравнительная эмульгирующая способность офсетных красок отечественного и зарубежного производства / В. Н. Серова, А. Р. Габдуллин // Вестник Казанского технологического университета. — 2011. — № 15. — С.102–106.

ВАРЕПО Лариса Григорьевна, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Метрология и приборостроение» Омского государственного технического университета.

БРАЖНИКОВ Андрей Юрьевич, начальник печатного центра ООО «Омскбланкиздат».
Адрес для переписки a_brazhnikov@bk.ru

Статья поступила в редакцию 14.01.2016 г.

© Л. Г. Варепо, А. Ю. Бражников

УДК 655.344:667.64

**Л. Г. ВАРЕПО
А. Ю. БРАЖНИКОВ**

Омский государственный
технический университет
ООО «Омскбланкиздат»

ОЦЕНКА ОТКЛОНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ УВЛАЖНЯЮЩЕГО РАСТВОРА В СИСТЕМЕ УВЛАЖНЕНИЯ ОФСЕТНОЙ ПЕЧАТНОЙ МАШИНЫ

В статье приводятся научные результаты экспериментальных исследований температурных режимов увлажняющего раствора и печатной эмульсии в красочном аппарате.

Ключевые слова: температурный режим увлажнения, плоская офсетная печать, спиртовое увлажнение.

Постановка задачи. В процессе офсетной печати на стабильность красочного слоя, на его оптическую плотность, на величину тонового приращення наибольшее влияние оказывают реологические свойства краски, интенсивность цвета, процент захвата краски, скорость взаимодействия увлажняющего раствора (УР) с печатной краской [1–2]. Из анализа научных работ отечественных и зарубежных авторов следует, что вопросы изучения подачи увлажняющего раствора, выбора его состава остаются актуальными и сегодня, что обусловлено внедрением современных технологий в производство [3–4]. Ряд вопросов в связи с этим остается малоизученным либо требует дополнительного уточнения.

В офсетных печатных машинах без терморегулирования красочного аппарата краска подвергается разного рода температурным воздействиям. В результате чего температура красочного слоя, наносящегося красочными валиками на печатные эле-

менты офсетной пластины, может существенно колебаться. Причем температурный фактор особенно важен для печатных машин со спиртовым увлажнением, поскольку оказывает влияние на интенсивность испарения спирта из увлажняющего раствора [5]. Как правило, процент содержания спирта в УР и температуру УР принимают как величины постоянные. Увлажняющий раствор в современных печатных машинах, готовится в специальных автоматических подготовительных устройствах, которые имеют встроенные холодильные установки, предназначенные для охлаждения раствора. В специальных автоматических подготовительных устройствах осуществляется: дозирование концентратов для обеспечения необходимой кислотности раствора; дозирование ИПС; охлаждение и поддержание температуры УР; очистка УР. Однако в процессе транспортировки УР по проводящей системе до увлажняющих валиков подвергается нагреву. В процессе формирования печатной эмульсии

в красочном аппарате увлажняющий раствор с более низкой температурой соединяется с офсетной краской, которая имеет более высокую температуру. Можно предположить, что процент содержания спирта в эмульсии будет величиной непостоянной, степень испарения его из печатной эмульсии будет меняться в процессе с отклонением температуры от заданного значения. Как следствие, это будет оказывать влияние на процесс эмульгирования, дестабилизируя печатный процесс [6–7].

Цель работы — определить интервал колебаний температурного режима УР в увлажняющей системе и печатной эмульсии в красочном аппарате.

Объекты и методы исследования. Исследования проводились на четырехкрасочной печатной машине ManRoland704 без терморегулирования красочного аппарата со спиртовым увлажнением. Система подготовки увлажняющего раствора — Technotrans. Измерения проводились с использованием инфракрасного термометра OSXL450 с лазерным прицелом для бесконтактного измерения температуры поверхности. Запатентованная лазерная прицельная система позволяет определить точку и произвести измерение температуры от -20 до 320°C . Точность измерения — $0,1^{\circ}\text{C}$. Погрешность измерений — 2 % от измерений.

Для измерения pH-, температуры и электропроводности увлажняющего раствора применялся прибор РМ 2000 PH. Замеры температуры производились в трех точках: 1 — левый край валика/цилиндра на расстоянии 50 мм от края, 2 — центр валика/цилиндра, 3 — правый край валика/цилиндра на расстоянии 50 мм от края.

Климатические условия в цехе: температура — 26°C , влажность — 36 %.

Режим работы машины: 8000 оттисков в час.

Состав увлажняющего раствора: концентрат Hydrofast GS 307 — 3 %, изопропиловый спирт — 11 %, с параметрами: pH — 5,1, электропроводность — $1030 \mu\text{S}$.

Состояние машины — середина рабочей смены, начало измерений — 2000 листов из 10 000, окончание измерений — 9000 оттисков из 10 000.

В экспериментах применялась офсетная краска LitoFlora FTX, производитель — Flint Group (Германия).

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. В красочном аппарате были измерены температуры: раскатного цилиндра и красочного накатного валика. В увлажняющем аппарате были измерены температуры: 3 — валика дозирования увлажнения; 4 — дуктора увлажняющего

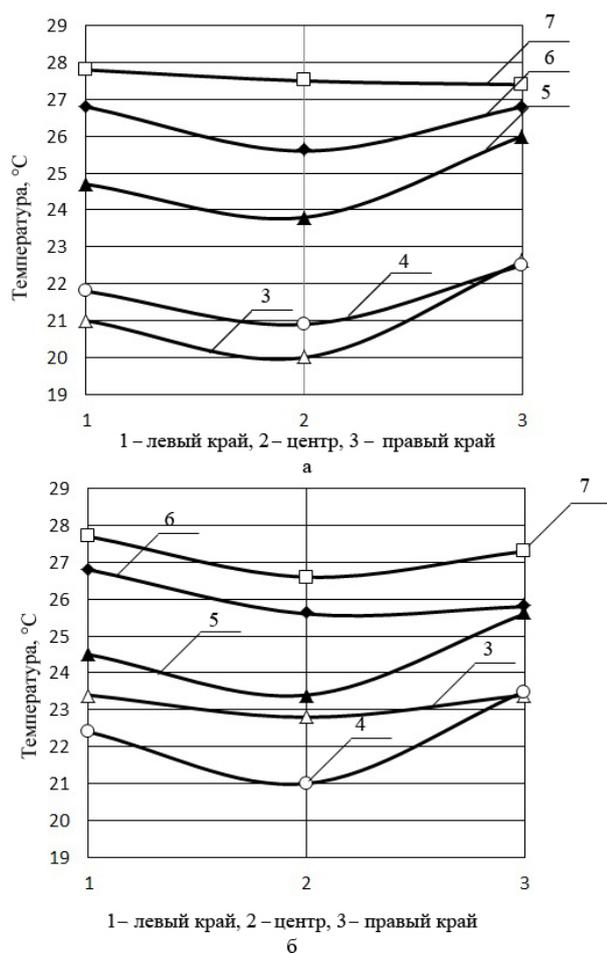


Рис. 1. Графики температур валиков/цилиндров увлажняющего аппарата: а — первая секция (black), б — вторая секция (cyan), г — валик дозирования увлажнения, 4 — дуктор увлажняющего аппарата, 5 — увлажняющий накатной валик, 6 — раскатной валик, 7 — мостовой валик

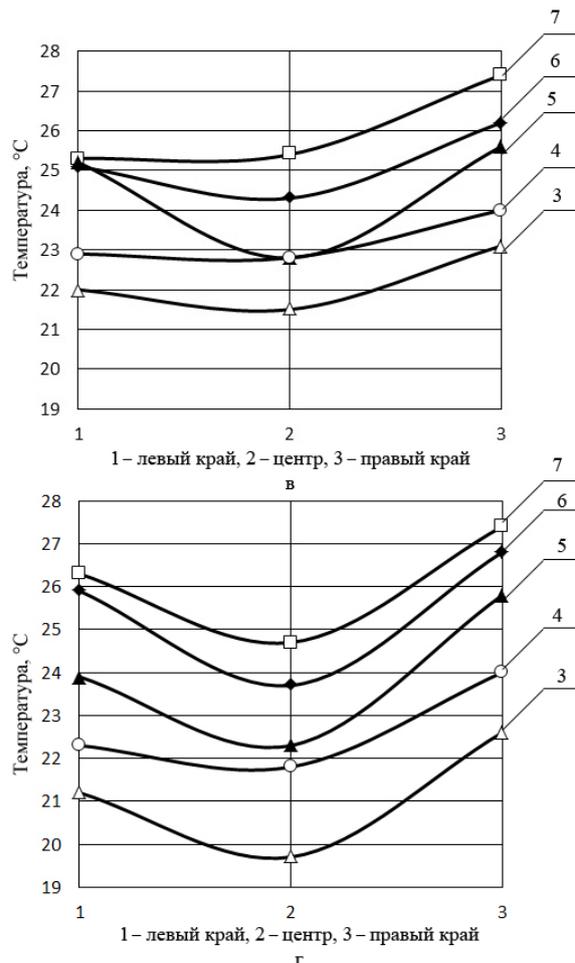


Рис. 2. Графики температур валиков/цилиндров увлажняющего аппарата: в — третья секция (magenta), г — четвертая (yellow) 3 — валик дозирования увлажнения, 4 — дуктор увлажняющего аппарата, 5 — увлажняющий накатной валик, 6 — раскатной валик, 7 — мостовой валик

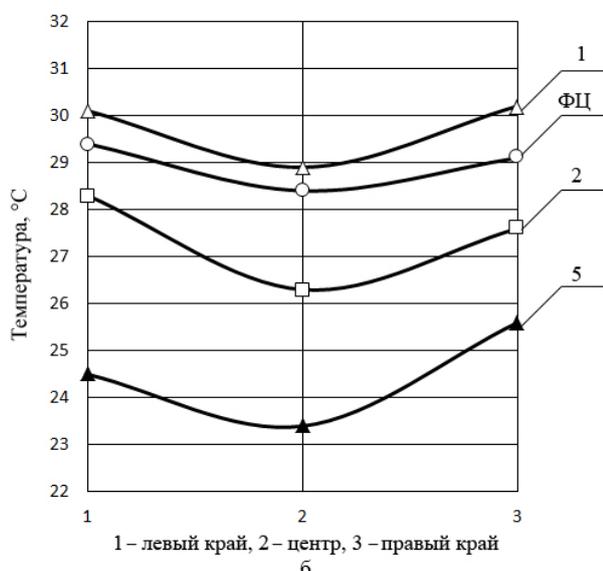
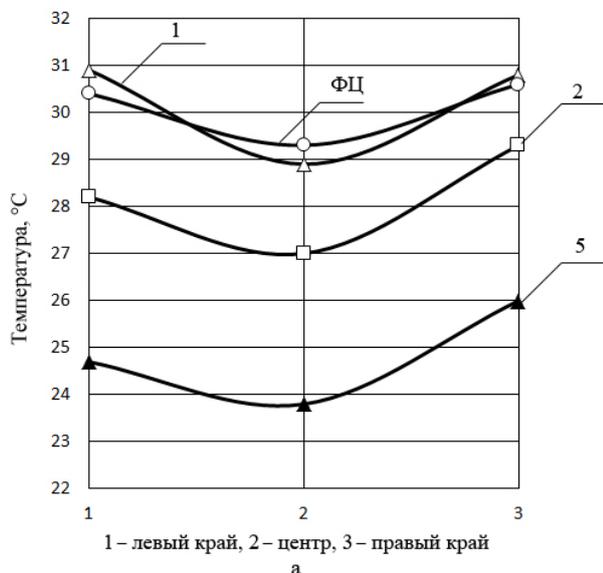


Рис. 3. Графики температур валков увлажняющего, красочного аппарата и формного цилиндра: а — первая секция (black), б — вторая секция (cyan), 1 — раскатной цилиндр, 2 — красочный накатной валик, 5 — увлажняющий накатной валик, ФЦ — формный цилиндр

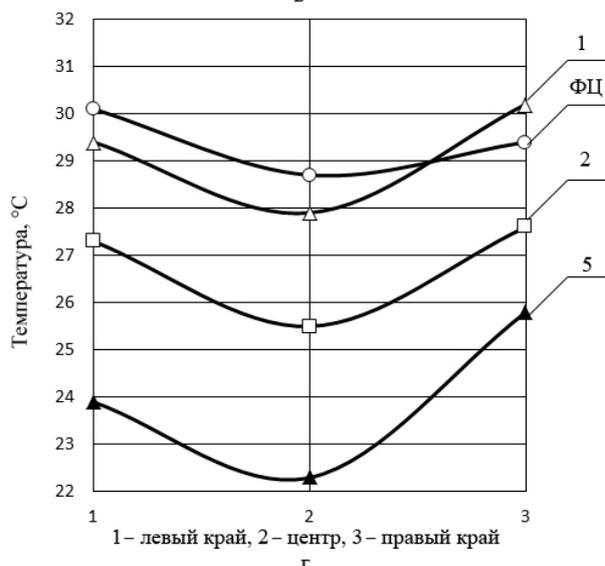
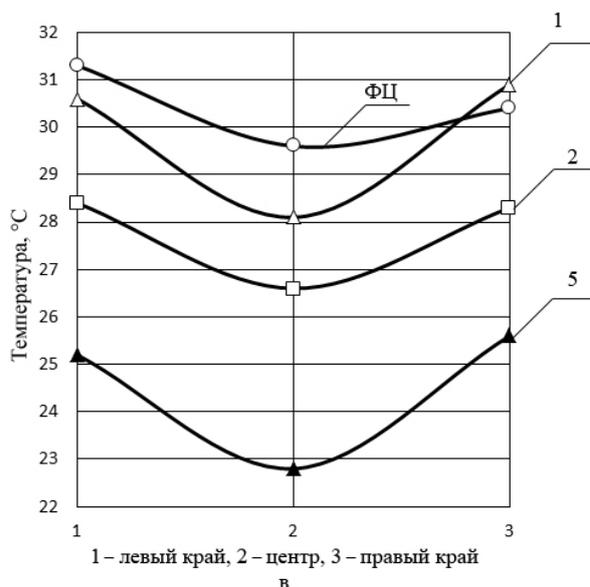


Рис. 4. Графики температур валков увлажняющего, красочного аппарата и формного цилиндра: в — третья секция (magenta), г — четвертая секция (yellow), 1 — раскатной цилиндр, 2 — красочный накатной валик, 5 — увлажняющий накатной валик, ФЦ — формный цилиндр

аппарата; 5 — увлажняющего накатного валика; 6 — раскатного валика; 7 — мостового валика.

Результаты экспериментальных исследований оценки температур валков увлажняющего аппарата, формного, офсетного, печатного цилиндров офсетной листовой печатной машины ManRoland 704, а также двухкрасочных валков (1 — раскатной цилиндр, 2 — накатной валик) представлены в виде графических зависимостей на рис. 1–5. Приведены значения температуры поверхностного слоя.

На рис. 1–2 показаны графики температур валков увлажняющей системы в печатной машине ManRoland 704 в процессе печати в условиях эксперимента. Из графиков видно, что в увлажняющем аппарате, который состоит из пяти валков, средняя температура УР повышается и располагается в ряд $3 < 4 < 5 < 6 < 7$. Наибольший нагрев температуры УР в увлажняющем аппарате наблюдается в 1-й секции и составляет $7,8^{\circ}\text{C}$, во 2-й секции — $6,7^{\circ}\text{C}$, в 3-й секции — $5,9^{\circ}\text{C}$, в 4-й секции — 5°C .

Максимальные значения температур УР достигаются на раскатном (6) — $26,8^{\circ}\text{C}$, и мостовом (7) — $27,8^{\circ}\text{C}$ валиках увлажняющего аппарата.

В процессе печати офсетная пластина одновременно находится в контакте с накатным валиком увлажняющего аппарата (5), с 4 — красочными накатными валиками и с резиной офсетного цилиндра.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3–4, показывает, что в процессе печати, смачивая пробельные элементы печатной офсетной формы, УР продолжает нагреваться.

Вступая в реакцию (эмульгирование) с красочной на поверхности красочных валков (1) и (2), молекулы увлажняющего раствора соединяются с молекулами краски, которые имеют большую температуру (рис. 5). В результате теплового взаимодействия двух жидких масс их температуры стремятся к тепловому равновесию [1]. В момент взаимодействия красочная эмульсия

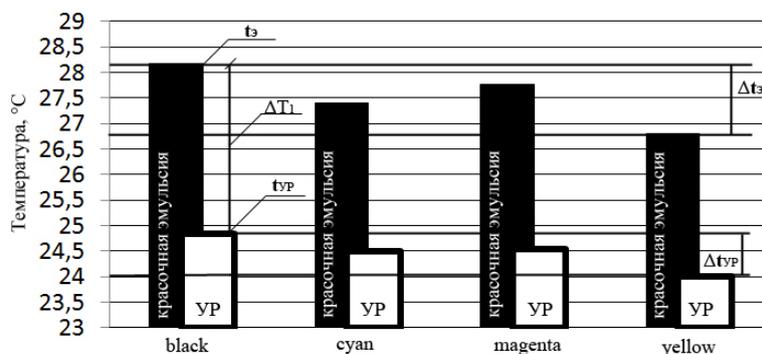


Рис. 5. Гистограмма сравнения температур красочной эмульсии и УР в момент их взаимодействия в печатных секциях машины:

t_k — температура красочной эмульсии,
 $t_{ур}$ — температура увлажняющего раствора

нагревает УР, а он, в свою очередь, охлаждает печатную эмульсию.

Расчеты показали, что в печатной машине средние температуры красочной эмульсии ($t_{кэ}$) формирующей красочный слой на формной пластине в четырех секциях (1 — black, 2 — cyan, 3 — magenta, 4 — yellow) равны: $t_{1э} = 28,17^\circ\text{C}$, $t_{2э} = 28,17^\circ\text{C}$, $t_{3э} = 28,17^\circ\text{C}$, $t_{4э} = 28,17^\circ\text{C}$. Следовательно, колебания температуры красочной эмульсии между секциями $\Delta t_э = 1,37^\circ\text{C}$.

Средние температуры увлажняющего раствора ($t_{ур}$) в момент его нанесения на формную пластину и в момент взаимодействия с печатной эмульсией в четырех секциях равны: $t_{1ур} = 24,83^\circ\text{C}$, $t_{2ур} = 24,5^\circ\text{C}$, $t_{3ур} = 24,53^\circ\text{C}$, $t_{4ур} = 24^\circ\text{C}$. Следовательно, колебания температуры увлажняющего раствора между секциями $\Delta t_{ур} = 0,83^\circ\text{C}$. Средняя разница температур между взаимодействующими жидкостями (печатной эмульсией и увлажняющим раствором) в четырех секциях: $\Delta T_1 = 3,33^\circ\text{C}$, $\Delta T_2 = 2,9^\circ\text{C}$, $\Delta T_3 = 3,23^\circ\text{C}$, $\Delta T_4 = 2,8^\circ\text{C}$.

Исследования показали, что колебания температуры красочной эмульсии между красочными секциями достигают $\pm 3,8^\circ\text{C}$ (max $t = 29,3^\circ\text{C}$, min $t = 25,5^\circ\text{C}$). Известно, что изменение температуры краски на 1°C влечет снижение вязкости краски до 10 % [6], поэтому для снижения влияния температурного колебания на формирование красочного слоя на формной пластине необходимо осуществлять подбор краски с учетом колебания вязкости краски в рабочем диапазоне температур.

При подготовке увлажняющего раствора в подготовительной системе Technotrans и охлаждении его до 14°C температура его при прохождении через систему увлажнения нагревается в среднем до $27,5^\circ\text{C}$. Средняя температура увлажняющих накатных валиков составила $24,5^\circ\text{C}$. Начало эмульгирования краски в процессе печати фиксируется на валиках (1) и (2) при температурах $29,7^\circ\text{C}$ и $27,5^\circ\text{C}$ соответственно. Из термодинамики известно [1], что на интенсивность испарения жидкости влияют 5 факторов: род жидкости, температура жидкости, площадь свободной поверхности, с которой происходит испарение, и наличие перемещающихся воздушных потоков над ее поверхностью.

Валики красочных и увлажняющих аппаратов печатной машины, а также формные, офсетные и печатные цилиндры являются телами, вокруг которых при вращении возникают воздушные потоки. Эти воздушные потоки усиливают поверхностное

трение воздушных масс, что усиливает интенсивность испарения. Причем при увеличении скорости печати будет увеличиваться интенсивность испарения и наоборот. Небольшая толщина красочного слоя на валах, по сравнению с открытой поверхностью валов, также способствует испарению. Причем интенсивность испарения составляющих эмульсионную печатную массу, которая состоит из спирта, воды и краски, будет снижаться в ряду спирт>вода>краска. Следовательно, величина содержания спирта в УР — величина переменная, зависящая как от температуры в системе увлажнения и в красочном аппарате, так и от скорости печати. Это может приводить к повышенному эмульгированию в красочной секции и к дестабилизации печатного процесса. Для минимизации описанного влияния необходимо осуществлять подбор красок с учетом их способности сохранять свои реологические свойства при неменяющейся концентрации спирта в УР и в печатной эмульсии.

Результаты исследования температурных режимов увлажняющего раствора и печатной эмульсии в красочном аппарате позволяют сделать следующие **ВЫВОДЫ**:

1. Температура увлажняющего раствора — величина переменная. В процессе транспортировки по системе увлажнения температура увлажняющего раствора в среднем повышается на $13,5^\circ\text{C}$.
2. В момент взаимодействия увлажняющего раствора и красочного слоя температура краски и увлажняющего раствора составляет в среднем $28,1^\circ\text{C}$. Диапазон колебания температуры краски и увлажняющего раствора в процессе эмульгирования составляет — $2,5^\circ\text{C}$.

Библиографический список

1. Теплотехника : учеб. для вузов / А. П. Басков [и др.] ; под ред. А. П. Баскакова. — 2-е изд., перераб. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 224 с.
2. Surland, A. Factors Determining the Efficiency of Lithographic Inks, TAGA Proceedings, 1983. — p.191–233.
3. Бозоян, М. А. Влияние режимов подачи увлажняющего раствора на оптические и градиционные характеристики оттиска в листовой офсетной печати / М. А. Бозоян, Н. А. Нечипоренко // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2015. — № 3. — С. 3–13.
4. Бозоян, М. А. Влияние режимов подачи увлажняющего раствора на цветные характеристики оттисков в листовой офсетной печати / М. А. Бозоян, Н. А. Нечипоренко //

Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2015. — № 3. — С. 14–22.

5. Марогулова, Н. Н. Расходные материалы для офсетной печати / Н. Н. Марогулова, С. И. Стефанов. — М. : Русский университет, 2002. — 240 с.

6. Эддред, Н. Что полиграфист должен знать о красках / Н. Эддред. — М. : ПРИНТ-МЕДИА центр, 2005. — 238 с.

7. Boonkuernoor, N. A Study to determine the relationship between emulsification and tack of offset lithographic inks // Naruchart Boonkuernoon. — Rochester Institute of Technology : RIT Scholar Works, 1994. — 147 p.

ВАРЕПО Лариса Григорьевна, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Метрология и приборостроение» Омского государственного технического университета.

БРАЖНИКОВ Андрей Юрьевич, начальник печатного центра ООО «Омскбланкиздат».

Адрес для переписки: a_brazhnikov@bk.ru

Статья поступила в редакцию 14.01.2016 г.

© Л. Г. Варепо, А. Ю. Бражников

УДК 621.762.04:004.356.2-023.5

С. Н. ЛИТУНОВ
В. С. СЛОБОДЕНЮК
Д. В. МЕЛЬНИКОВ

Омский государственный
технический университет

ОБЗОР И АНАЛИЗ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. Часть 1

Рассмотрены различные способы и устройства 3D-печати. Предложена конструкция печатной головки 3D-принтера, использующая принцип струйной печати. Головка позволяет использовать для печати высоковязкие материалы. Проведен сравнительный анализ 3D-технологий. Сделаны прогнозы о направлениях развития аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-технологии.

В глобальной сети Интернет находится большое количество информационного материала, касающегося 3D-печати. Неудобство для конечного читателя заключается в том, что материал «разбросан» по многим ресурсам, плохо структурирован, не всегда удается отличить, где вымысел, а где представлены достоверные данные. Мы постарались структурировать основную известную нам информацию по существующим 3D-технологиям и изложить её в удобной форме.

Под аддитивными принято понимать группу технологий, которые позволяют изготавливать различные изделия за счет послойного нанесения жидкого (или разжиженного) исходного материала на будущее изделие, расположенное на специальном столе, посредством перемещения специальной головки в горизонтальной плоскости. После нанесения очередного слоя стол опускается на величину, равную толщине наносимого слоя. Движение головки и стола задается алгоритмом, разработанным заранее с помощью специального программного обеспечения, и реализуется шаговыми двигателями. После нанесения очередного слоя материал теряет текучесть, становится твердым под действием химических реакций или вследствие остывания. В настоящее время аддитивные технологии представлены несколькими способами печати, которые различаются исходным материалом и принципом его нанесения [1].

Другими, и более распространенными, названиями аддитивных технологий являются 3D-технология и 3D-печать (D — Dimension, размер (англ.)). Последнее название возникло из аналогии с печатью

изображений на плоских материалах (бумаге, пленке) с помощью струйного принтера. Иногда струйную печать называют 2D-печатью.

Схожесть 2D- и 3D-печати обусловлена также тем, что нанесение слоя исходного материала происходит посредством головки, которую называют печатающей головкой. Конструкция печатающей головки зависит от исходного материала и метода его нанесения. Как и печать на бумаге, струйная и 3D-печать относятся к так называемым цифровым технологиям и обладают следующими общими преимуществами:

- малыми финансовыми и временными затратами на подготовку производства;
- относительно невысокой ценой и высокой скоростью изготовления заказа, состоящего из нескольких изделий;
- возможностью изготовления партии изделий с существенными, вплоть до полного несовпадения, отличиями между соседними образцами.

В то же время этим технологиям присущи и некоторые недостатки, среди которых можно отметить:

- незначительную зависимость цены одного изделия от количества изделий в партии;
- значительные затраты времени при изготовлении заказа, состоящего из большого количества изделий;
- потеря преимуществ во времени по сравнению с традиционными технологиями при использовании послепечатной обработки изделий;
- ограниченный перечень исходных материалов, применяемых при печати;

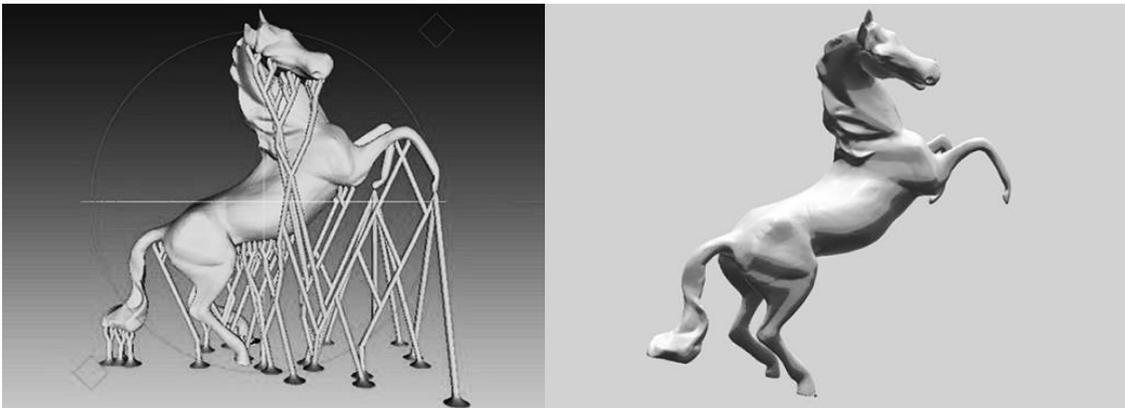


Рис. 1. Применение поддержек структур при изготовлении изделия FDM-методом: слева — изделие с поддержками, справа — готовое изделие

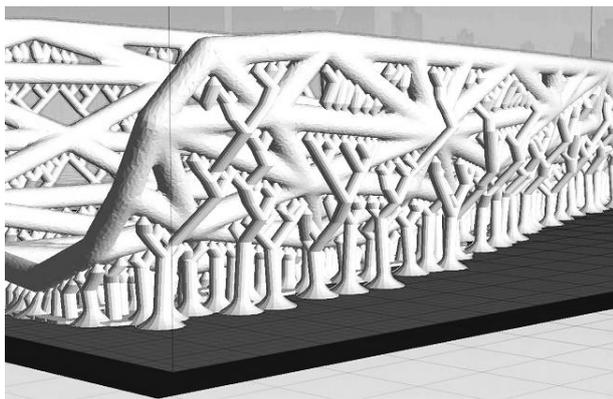


Рис. 2. Поддержки сложной структуры



Рис. 3. Катушки с исходным материалом для FDM-метода

— ограничения по прочностным характеристикам изделий.

Нужно отметить, что 3D-печать, в отличие от 2D-печати, обладает возможностью изготовления изделий, которые невозможно изготовить при использовании классических технологий. Так, на 3D-принтере можно изготовить детали с закрытыми полостями, которые изготавливают за один технологический цикл. В качестве примера можно привести имплантат кости животного или человека.

Изделия, получаемые с помощью 3D-технологий, можно разделить на две основные группы: изделия-макеты и изделия конечного потребления. К первым относятся макеты зданий, деталей, узлов. Их используют в качестве презентационных материалов, для оценки внешнего вида и функциональности, проверки взаимодействия отдельных деталей в узле и т.п. Ко второй группе относятся изделия, готовые к применению, иногда после дополнительной обработки: втулки, валы, детали декора и т.п. Во многих случаях наибольший экономический эффект от применения 3D-печати достигается при производстве изделий конечного потребления.

В некоторых способах 3D-печати необходимо использование поддержек (элементов, которые служат для поддержания частей изделия, нависающих под углом более 23° С (рис. 1)). Поддержки могут быть изготовлены как из материала основного изделия, так и другого, более дешевого материала [2]. Для экономии материала внутренность поддержек не сплошная, а в виде пространственной решетки. Программы, в которых проектируется изделие, содержат библиотеки таких решеток. В некоторых

случаях поддержки представляют собой довольно сложные конструкции (рис. 2), что требует от конструктора дополнительных знаний и навыков. Кроме того, при изготовлении сложных изделий с поддержками неизбежны ошибки, которые выявляются в процессе печати и исправляются при повторном изготовлении. Также нужно учитывать повышенный расход исходного материала на изготовление поддержек. Как правило, отрезанные поддержки выбрасывают, так как их сбор и переработка повсеместно не налажены.

После окончания печати бывает трудно отличить основное изделие от поддержек. Для того чтобы отличить поддержки, применяют материал другого цвета (при механической обрезке) или материалы, растворимые в специальном составе. В случае применения другого материала для поддержек необходимо устройство с двумя печатающими головками, что увеличивает стоимость оборудования.

Среди основных 3D-технологий, имеющих сегодня на рынке, можно выделить следующие.

Способ послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM-метод). Эта технология появилась в конце 1980-х годов. Ее автор Скот Крамп (Scott Crump) позже запатентовал ее [3] и основал компанию Stratasys. Исходный материал представляет собой пластиковый пруток (рис. 3), обычно диаметром 1–3 мм, поставляемый в катушках [4]. Поставщики предлагают разные цвета и оттенки исходного материала. Кроме того, пруток нужного цвета могут изготовить по индивидуальному заказу.

Пруток с помощью направляющих роликов или винтов подается в печатающую головку

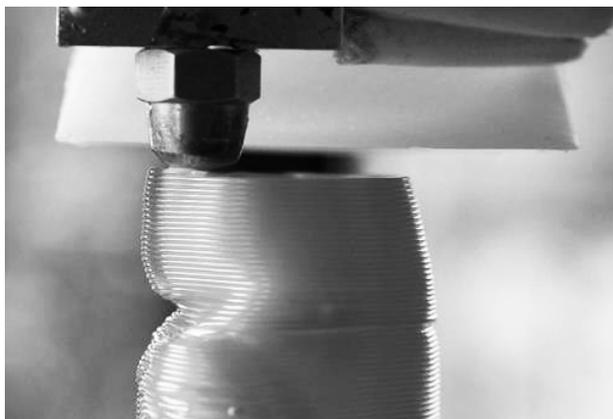


Рис. 4. Сопло печатающей головки

и пропускается через специальное сопло (рис. 4). Головка нагревает материал и подает его на изделие. Электронная система регулирует подачу материала и управляет движением головки и стола. Алгоритм управления печатающей головкой должен предусматривать наплавление слоя полимера безотрывно, что создает некоторые ограничения при изготовлении изделий с закрытыми полостями.

Схематично печатающее устройство, в котором реализован FDM-метод, показано на рис. 5.

Толщина слоя регулируется скоростью вращения подающих роликов. После нанесения пластик остывает и затвердевает. В качестве исходного материала используют как термореактивные, так и термопластичные полимеры. Основными требованиями к таким полимерам являются низкая температура плавления и высокие механические свойства. Для 3D-печати FDM-методом применяют ABS-пластик, поликарбонат, полиметакрилат, поликапролактон, полифенилсульфон, полиамиды, полистирол, лигнин, парафиноподобные соединения и другие [5]. Свойства перечисленных материалов отличаются друг от друга, поэтому выбор исходного материала зависит от требований к конечному изделию. В целом же для большинства изделий, по совокупности характеристик, более всего подходит и наиболее часто применяется ABS-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол). Он обладает высокими прочностными характеристиками, устойчив к растворам щелочей кислот, спиртов. Температура размягчения ABS-пластика составляет 100 °С, что достаточно для того, чтобы избежать тепловой деформации детали, работающей в обычных условиях. Температура плавления ABS-пластика (210–245 °С) в печатающей головке легко достижима. Текучесть расплава такова, что минимальная толщина наносимого слоя составляет не менее 50–100 мкм. Этот материал легко поддается механической и химической обработке. В последнем случае при обработке растворителем (например, ацетоном) ABS-пластик склеивается с образованием монолитной структуры [6], что бывает необходимо при соединении нескольких разных деталей.

Преимуществами FDM-технологии являются:

- относительная простота процесса и доступность оборудования. В глобальной сети существует проект RepRap, который предоставляет в открытом доступе все схемы и комплектующие, позволяющие собрать принтер самостоятельно.

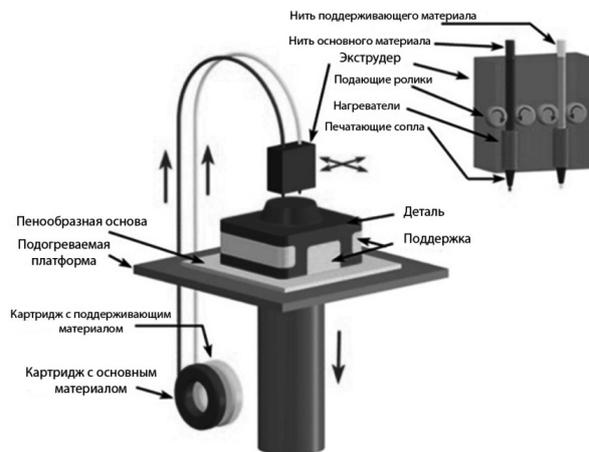


Рис. 5. Принципиальная схема печатающего 3D-устройства по FDM-методу

- невысокая цена производства. Исходные материалы относительно недороги и доступны. При наличии небольшого экструдера несложно наладить изготовление прутка;

- большой выбор исходных материалов. На рынке представлено множество цветов и оттенков ABS-пластика и других подходящих для этого метода материалов.

К недостаткам можно отнести:

- необходимость использования поддержек;
- необходимость дополнительной обработки после окончания печати (удаление поддержек, механическая обработка);

- ограниченная возможность изготовления нескольких изделий одновременно на одном устройстве, поскольку головка наносит каждый слой полимера безотрывно.

На рис. 6 представлены образцы макетов, изготовленных по технологии FDM [7].

Выборочное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS-метод). Этот способ был разработан Карлом Декартом (Carl Deckard) в Университете Остина (США) и запатентован в 1989 году фирмой DTM Corporation [8]. В качестве исходных материалов используют порошки, состоящие из частиц пластика, керамики, стекла, металла. Частицы порошка покрывают слоем полимера, обеспечивающим возможность спекания.

Перед началом печати, рабочую камеру и порошок необходимо предварительно прогреть до равномерной температуры. Это позволяет избежать температурных перепадов в процессе печати. Порошок при помощи разравнивателя (валика или пластины) распределяется равномерным слоем по всей площади, предназначенной для печати. После этого лазер запекает только те участки порошка, которые соответствуют сечению модели на этом слое (рис. 7) [9]. В случае, когда используется металлический порошок, после печати объекта, проводят его окончательное спекание в термопечи. Это необходимо для того, чтобы снять возникшие в процессе печати внутренние напряжения и удалить остатки полимера из изделия и придать ему монолитную структуру.

Процесс запекания варьируется по температуре (задается мощностью лазера) и длительности (задается программой управления лазером).

Минимальная толщина запекаемого слоя составляет 0,1–0,15 мм, а вертикальная скорость печати —

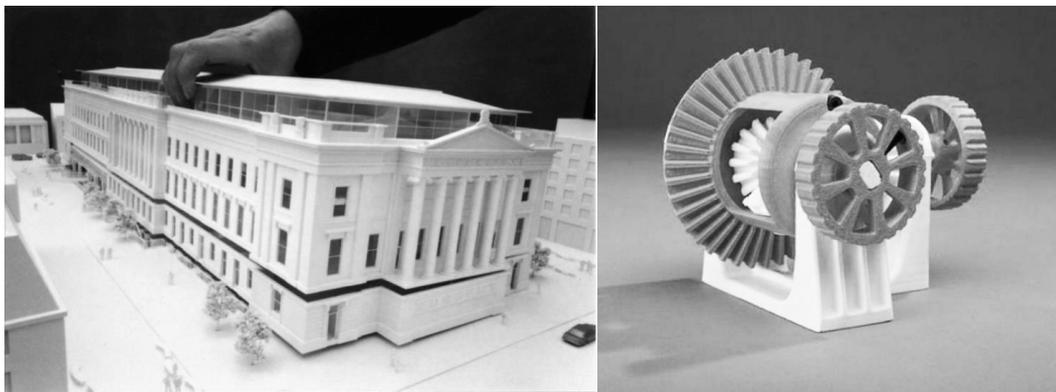


Рис. 6. Макеты изделий, полученные с помощью FDM-метода: слева — макет здания, справа — механический узел

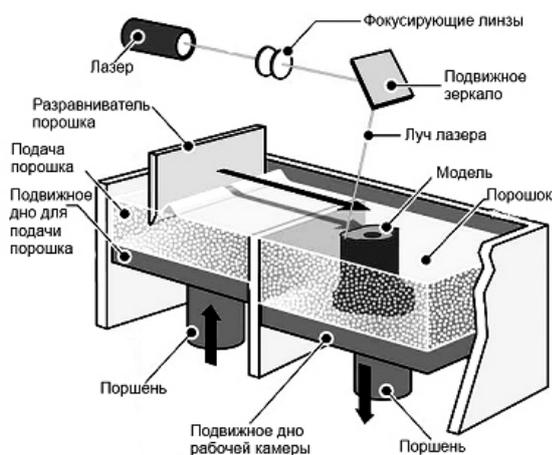


Рис. 7. Принципиальная схема работы устройства по SLS-методу

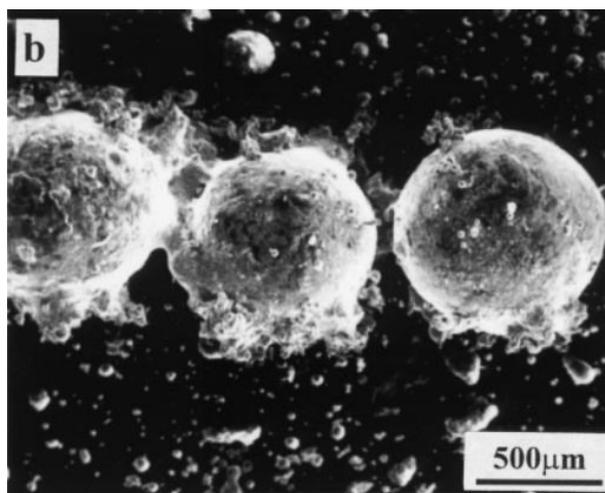


Рис. 8. Образование шариков при плавлении металла (сфероидизация)

до 35 мм/час. Преимуществами SLS-технологии являются:

- отсутствие необходимости в поддержках, так как окружающий порошок не дает модели разрушиться, пока окончательная форма еще не обретаена;
- широкие возможности получения изделий конечного применения за счет таких материалов, как металлический или керамический порошок;
- низкие напряжения и деформации в создаваемых объектах;
- возможность повторного использования не оплавленного порошка;
- возможность изготовления нескольких изделий одновременно в рабочей камере;

К недостаткам относятся:

- меньшая доступность способа за счет более высокой сложности и стоимости оборудования и исходного материала;
- высокие затраты энергии и времени на предварительный подогрев порошка и рабочей камеры;
- шероховатость получаемой поверхности изделия (в пределах Ra 6,3–12,5 мкм), что в некоторых случаях требует дополнительной механической обработки.

Данный способ позволяет расширить ассортимент изделий конечного применения.

Выборочное тепловое спекание (Selective Heat Sintering, SHS-способ). Впервые было представлено компанией BluePrinter ApS в 2011 году на выставке

Euromold как альтернатива технологии SLS. Этот способ схож с SLS-способом и является его менее дорогим аналогом. Принципиальное различие заключается в использовании вместо лазера тепловой печатающей головки. Лучше всего SHS-способ подходит для производства недорогих функциональных изделий. В качестве исходного материала используются пластики или металлы с низкой температурой плавления. Отпечатанные изделия из металла требуют дополнительного обжига для повышения прочности.

Преимущества SHS-метода:

- более низкая стоимость оборудования, чем в SLS-способе;
- засвечивание всего слоя объекта целиком.

Недостатки метода:

- более низкое, чем в SLS-способе, разрешение печати;
- низкая энергетическая отдача нагревательного элемента;
- узкий ассортимент исходных материалов;
- необходимость термической обработки изделий.

Выборочная лазерная плавка (Selective Laser Melting, SLM-способ). Этот способ был разработан в 1995 году Вильгельмом Майнерсом (Wilhelm Meiners) и Куртом Виссенбахом (Kurt Wissenbach) в Институте лазерных технологий Фраунгофера (Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Германия). Позже к проекту подключились Дитер Шварц (Dieter

Schwarz) и Маттиас Фокеле (Matthias Fockele) из компании F&S Stereolithographie GmbH, после чего способ был запатентован [10].

В этом способе, в отличие от SLS-метода, металлические частицы доводятся до состояния расплавления и свариваются друг с другом, образуя жесткий каркас. Сваривание происходит в герметичной камере, заполненной инертным газом — аргоном или азотом со сверхмалыми примесями кислорода. По контурам сечения проходит сплошная сварка, а внутренности стенок изделия могут свариваться в виде пространственной решетки. Остатки порошка могут использоваться повторно. Шаг вертикального перемещения стола составляет 20–100 мкм.

Исходными материалами являются порошки из нержавеющей и инструментальной стали, сплавов хрома и кобальта, титана, алюминия. Возможно применение и других сплавов, если порошки из них будут иметь необходимые характеристики сыпучести.

К преимуществам данного метода можно отнести:

- возможность создавать изделия с множеством закрытых полостей;
- возможность создавать объекты с большой площадью поверхности, но малым объемом;
- обширную область промышленного применения (от медицины, до аэрокосмической отрасли).

К недостаткам относят:

- сфероидизацию (эффект «образования шариков» под действием сил поверхностного натяжения вместо сплошной дорожки расплава) для некоторых видов сплавов (олово, медь, цинк, свинец);
- наличие внутренних напряжений в изделии;
- ограничение в использовании легированных сталей, связанное с их высокой температурой плавления и зависящее от конкретных присадок в стали;
- высокую стоимость оборудования и исходных материалов.

Явление сфероидизации (рис. 8) ведет к повышению пористости изделия. Нормальная пористость изделий, полученных методом SLM, составляет 0–3%. После изготовления изделие подвергается дополнительной термообработке для снятия внутренних напряжений, увеличения прочности, улучшения структуры металла [11].

SLM-метод позволяет получать широкий ассортимент изделий конечного применения.

Прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering, DMLS-метод). Метод разработан компанией EOS из Мюнхена, Германия, в середине 1990-х годов. В качестве исходного материала могут использоваться практически любые металлы и сплавы в виде порошка.

На рынке представлен широкий перечень материалов для DMLS-способа: порошки на основе бронзы, нержавеющей и мартенситно-старенеющей стали, кобальт-хром-молибденового, титанового и алюминиевого сплавов и др. [12]. В качестве нагревательного элемента для спекания порошка используют оптоволоконные лазеры мощностью порядка 200 Вт. Как и в SLS методе, лазер спекает слой порошка в рабочей камере, соответствующий контуру объекта, после чего наносится новый слой порошка и процесс повторяется. Данный способ характеризуется высоким разрешением печати — в среднем 20 мкм.

Среди преимуществ метода можно отметить:

- высокое разрешение печати;
- отсутствие необходимости поддержек;



Рис. 9. Принципиальная схема работы устройства по технологии EBM

- возможность повторного использования порошка;
- отсутствие ограничений по геометрической сложности изделия;
- высокая точность исполнения;
- минимизация необходимости механической обработки изделия;
- возможность создавать несколько изделий одновременно в рабочей камере.

К недостаткам можно отнести:

- более пористую структуру и низкую прочность готового изделия по сравнению с традиционными методами обработки металла (точение, фрезерование и др.);
- высокую стоимость оборудования и исходных материалов.

Развитием DMLS-способа является способ микролазерного спекания (Micro Laser Sintering, MLS-способ), который разработали специалисты фирмы EOS из Мюнхена, Германия. Это метод позволяет печатать объекты очень малых размеров. С его помощью получают изделия конечного потребления для медицины, микроэлектронной промышленности, ювелирные изделия. Толщина слоя, получаемая в этом способе, составляет 1–5 нм, при максимальном размере изделия 6 см в диаметре и 3 см в высоту. Исходный материал — порошок молибдена и нержавеющей стали. MLS-способ обладает очевидными преимуществами наряду с такими недостатками, как высокая стоимость оборудования и исходных материалов, ограниченные размеры изделия.

Электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting, EBM-метод). Технология разработана в 2000-х годах шведской компанией Argam AB [13]. Исходный материал представляет собой порошок чистого металла, связующего и наполнителя. Как правило, это титановые сплавы, но иногда используются и другие металлы для получения каких-либо специфических свойств.

Для расплавления порошка используется управляемый поток электронов, который генерируется электронной пушкой. С помощью управляемого магнитного поля этот поток фокусируется и позиционируется (рис. 9) [14]. Сочетание вакуума и общей высокой температуры (700–1000°C)

позволяет добиться снижения внутренних напряжений в изделии, поэтому этот способ не требует последующей температурной обработки, а прочность изделия сопоставима с прочностью кованных сплавов.

Кроме того, EBM-способ работает быстрее и точнее других благодаря высокой энергетической плотности электронного луча.

Минимальная толщина слоя составляет 50 мкм, точность построения модели ± 200 мкм.

Преимущества данного метода:

- отсутствие необходимости термообработки изделия после печати;
- высокая прочность, сопоставимая с коваными изделиями;
- более высокая скорость построения, чем при других методах;

- низкая пористость готовых изделий;

- отсутствие необходимости поддержек.

К недостаткам можно отнести:

- высокие затраты энергии;
- высокую сложность и стоимость оборудования и исходных материалов;
- необходимость изоляции печатного устройства вследствие высокой интенсивности излучения.

Библиографический список

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. — М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. — 220 с.
2. Этапы 3D-печати. Цифровая модель с поддерживающими конструкциями [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/Jetapy-3D-pechati> (дата обращения: 05.11.2015).
3. Crump, S. Apparatus and method for creating three-dimensional objects US patent 5121329, filed October 30th, 1989, published June 9th, 1992.
4. Пластик для 3D печати поддержки HIPS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://250041.ua.all.biz/plastik-dlya-3d-pechati-podderzhki-hips-g8707738> (дата обращения: 05.11.2015).
5. Моделирование методом наплавления [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://can-touch.ru/blog/fused-deposition-modeling> (дата обращения: 05.11.2015).
6. Обзор производителей расходных материалов для FDM 3D-принтеров [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://geektimes.ru/post/231299/> (дата обращения: 07.11.2015).
7. Цифровые модели [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://images.rambler.ru/search?query=модели%203d%20печати&adult=soft&i=1&utm_source=ramblersearch&utm_medium=mixup&utm_campaign=images_up (дата обращения: 08.11.2015).
8. Deckard, C. Method and apparatus for producing parts by selective sintering, US patent 4863538, filed October 17th, 1986, published September 5th, 1989.
9. Выборочное лазерное спекание [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/SLS_print/ (дата обращения: 09.11.2015).
10. Meiners, Wissenbach & Gasser, Selective Laser Sintering at melting temperature, German patent DE 19649865, filed December 2nd, 1996, published Feb. 12th, 1998.
11. Технологии лазерного аддитивного производства металлических изделий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://geektimes.ru/post/218271/> (дата обращения: 09.11.2015).
12. Direct Metal Laser Sintering или прямое лазерное спекание [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://can-touch.ru/blog/dmls/> (дата обращения: 13.11.2015).
13. Yamamoto N., Sakai K. Electron beam melting method for metallic material US patent 6858059, filed October 25th, 2002, published October 22th, 2005.
14. Electron Beam Melting (EBM) или технология электронно-лучевой плавки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://can-touch.ru/blog/3d-printing-ebm/> (дата обращения: 17.11.2015).

ЛИТУНОВ Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор, заведующий кафедрой «Оборудование и технологии полиграфического производства».

СЛОБОДЕНЮК Василий Сергеевич, магистрант гр. ТПм-141 факультета элитного образования и магистратуры.

МЕЛЬНИКОВ Дмитрий Владимирович, студент гр. ТП-141 нефтехимического института. Адрес для переписки: Max.264@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.01.2016 г.

© С. Н. Литун, В. С. Слободенюк, Д. В. Мельников

Книжная полка

621.791/Е70

Еремин, Е. Н. Плазменно-дуговая резка: моногр. / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. — 263 с.

Систематизирована и обобщена информация, дающая представление о современном состоянии плазменной резки в промышленном производстве. Рассмотрены свойства плазменной дуги и особенности устройств для ее получения. Описаны разновидности плазменной резки. Приведены конструктивные особенности и технико-экономические характеристики оборудования для плазменной резки отечественного и импортного производства. Даны практические рекомендации по использованию плазменной резки в различных отраслях промышленности.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников сварочного производства машиностроительных предприятий и может быть использована студентами и аспирантами родственных специальностей.

РАСЧЁТ ВЯЗКОСТИ ФЛЮСОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА НА ОСНОВЕ СПОСОБА РАВНЫХ СУММ

Способом равных сумм приведен аналитический способ расчета вязкости η в зависимости от температуры T расплавленных флюсов для электрошлакового переплава металлов. Установлено, что разница в значениях вязкости η от T , определенных по предложенному способу и полученных экспериментально, не превышает $\pm 1,5\%$. Предлагаемый способ расчета позволяет прогнозировать η расплавленных флюсов при любых температурах, не прибегая к эксперименту.

Ключевые слова: флюсы, вязкость, эксперимент, металл, температура, электрошлаковый переплав.

Вязкость является наиболее важным технологическим свойством сварочных флюсов [1]. Она определяет интенсивность прохождения физико-химических процессов при электрошлаковом переплаве. В области рабочих температур вязкость косвенно характеризует рафинирующую способность шлака и его электрическую проводимость, а при температуре кристаллизации металла — его формирующую способность [2, 3].

В целях совершенствования электрошлаковых технологий возникает необходимость знания вязкости флюсов при различных температурах электрошлакового процесса. Но в связи с высокими температурами этого процесса, экспериментальное измерение вязкости флюсов обусловлено рядом трудностей.

Основываясь на значениях вязкости, экспериментально замеренных при пониженных температурах, расчётным методом можно получить уравнения, позволяющие рассчитывать вязкость флюсов при любых температурах, в том числе и при температурах электрошлакового процесса.

Уравнение зависимости вязкости флюсов от температуры выражается в виде экспоненциального закона [4]

$$\eta = A \cdot e^{-\frac{E_\eta}{RT}} \quad (1)$$

где η — вязкость расплавленного флюса, Па·с;

A — константа, зависящая от природы расплавленного флюса;

E_η — энергия активации вязкого течения, Дж/моль;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T — температура, К.

После логарифмирования уравнение (1) примет вид

$$\lg \eta = \lg A - \frac{E_\eta}{R \cdot T} \cdot \lg e. \quad (2)$$

При $\lg e$, равном 0,43429, уравнение (2) будет:

$$\lg \eta = \lg A - \frac{E_\eta}{R \cdot T} \cdot 0,43429. \quad (3)$$

Приравнивая $\lg A = a$; $(-\frac{E_\eta}{R} \cdot 0,43429) = b \cdot 10^3$, получим уравнение

$$\lg \eta = a + b \cdot T^{-1} \cdot 10^3. \quad (4)$$

Уравнение (4) аналогично уравнению прямой $y = a + b \cdot x$.

Для ряда флюсов, используемых при электрошлаковом переплаве, зависимость вязкости от температуры носит прямолинейный характер.

В качестве примера возьмем флюс состава 20 % CaF₂ + 10 % Al₂O₃ + 5 % CaO + 35 % SiO₂ + 25 % MnO + 5 % MgO.

Его температурная зависимость вязкости, полученная экспериментально, близка к прямой (рис. 1).

Для практических расчётов в уравнении (4) необходимо определить коэффициенты a и b . Для их нахождения воспользуемся методом наименьших квадратов, представляющих собой систему уравнений [5]:

$$\left. \begin{aligned} n \cdot a + b \sum_{k=1}^n x_k + c \sum_{k=1}^n x_k^2 + \dots &= \sum_{k=1}^n y_k; \\ a \cdot \sum_{k=1}^n x_k + b \sum_{k=1}^n x_k^2 + c \sum_{k=1}^n x_k^3 + \dots &= \sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k; \\ a \cdot \sum_{k=1}^n x_k^2 + b \sum_{k=1}^n x_k^3 + c \sum_{k=1}^n x_k^4 + \dots &= \sum_{k=1}^n x_k^2 \cdot y_k. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для нахождения коэффициентов a и b из системы уравнений (5) берем только два уравнения,

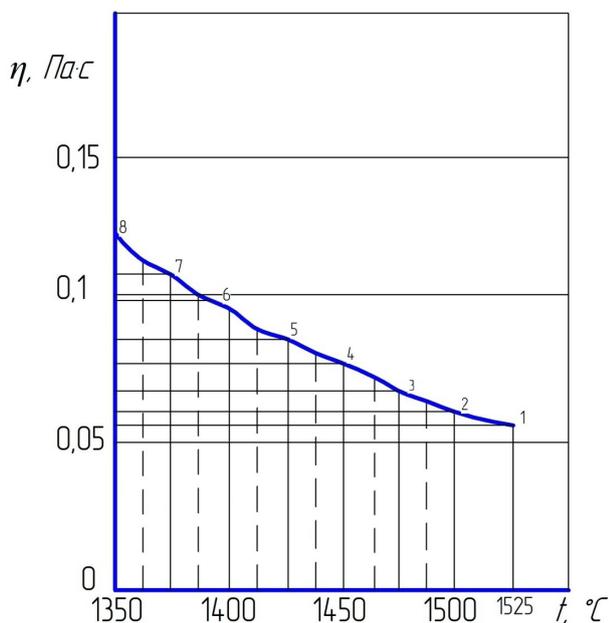


Рис. 1. Температурная зависимость вязкости флюса состава
20 % CaF₂ + 10 % Al₂O₃ + 5 % CaO + 35 % SiO₂ +
+ 25 % MnO + 5 % MgO

исключая из его левых частей слагаемые с коэффициентом с. Тогда система уравнений (5) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} n \cdot a + b \sum_{k=1}^n x_k &= \sum_{k=1}^n y_k; \\ a \cdot \sum_{k=1}^n x_k + b \sum_{k=1}^n x_k^2 &= \sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $n = k$.

Необходимость суммирования различных степеней абсцисс и их произведений на ординаты сильно затрудняет применение метода наименьших квадратов. В этом случае лучше использовать способ равных сумм. Он заключается в том, что из системы уравнений (6) используется только первое, но зато столько раз, сколько коэффициентов уравнения (4) необходимо определить.

Для нахождения коэффициентов a и b из системы уравнений (6) запишем первое уравнение два раза с разными пределами (уравнение 7).

$$\left. \begin{aligned} \frac{n}{2} \cdot a + b \sum_{k=1}^{n/2} x_k &= \sum_{k=1}^{n/2} y_k; \\ \frac{n}{2} \cdot a + b \sum_{k=\frac{n}{2}+1}^n x_k &= \sum_{k=\frac{n}{2}+1}^n y_k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для нахождения пределов температуры от 1350 до 1525 °С с интервалом 25 °С разбиваем на 8 частей (рис. 1). На оси ординат находим значения вязкости, соответствующие каждой температуре. Эти данные заносим в табл. 1.

Для первого уравнения пределы берем от 1 до 4, для второго — от 5 до 8.

После подстановки пределов в уравнение (7) оно примет вид

$$\left. \begin{aligned} 4 \cdot a + b \sum_{k=1}^4 x_k &= \sum_{k=1}^4 y_k; \\ 4 \cdot a + b \sum_{k=5}^8 x_k &= \sum_{k=5}^8 y_k \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Используя данные табл. 1, из уравнения (8) находим значения x_k и y_k при пределах от 1 до 4 и от 5 до 8.

$$\sum_{k=1}^4 x_k = 0,556 + 0,564 + 0,572 + 0,580 = 2,272,$$

$$\sum_{k=1}^4 y_k = -1,244 - 1,200 - 1,161 - 1,113 = -4,718.$$

$$\sum_{k=5}^8 x_k = 0,589 + 0,597 + 0,607 + 0,616 = 2,409,$$

$$\sum_{k=5}^8 y_k = -1,060 - 1,010 - 0,960 - 0,911 = -3,941.$$

Вычисленные суммарные значения x_k и y_k подставим в уравнение (8) и получим систему уравнений

Таблица 1

Зависимость вязкости от температуры флюса состава
20% CaF₂ + 10% Al₂O₃ + 5% CaO + 35% SiO₂ + 25% MnO + 5% MgO

k	t, °C	T, K	T ⁻¹ ·10 ³ = x _k	η	Экспериментальные lg η = y _k	Расчетные lg η
1	1525	1798	0,556	0,057	-1,244	-1,246
2	1500	1773	0,564	0,063	-1,200	-1,202
3	1475	1748	0,572	0,069	-1,161	-1,156
4	1450	1723	0,580	0,077	-1,113	-1,113
5	1425	1698	0,589	0,0869	-1,060	-1,060
6	1400	1673	0,597	0,0976	-1,010	-1,010
7	1375	1648	0,607	0,1095	-0,960	-0,959
8	1350	1623	0,616	0,1226	-0,911	-0,905

$$\left. \begin{aligned} 4 \cdot a + 2,272 \cdot b &= -4,718 \\ 4 \cdot a + 2,409 \cdot b &= -3,941 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Решая эту систему уравнений, находим значения коэффициентов $a = -4,400$; $b = 5,671$.

Тогда уравнение логарифма вязкости от температуры для флюса систем 20% CaF_2 + 10% Al_2O_3 + 5% CaO + 35% SiO_2 + 25% MnO + 5% MgO будет иметь вид прямой

$$\lg \eta = -4,400a + 5,671 \cdot T^{-1} \cdot 10^3. \quad (10)$$

Расчётные значения $\lg \eta$ для различных температур T рассмотренного выше флюса, согласно полученной формуле (10), приведены в табл. 1. Разница в значениях вязкости, полученных в результате эксперимента и вычисленных на основе способа равных сумм, составляет $\pm 1,5\%$.

Имеются флюсы для электрошлакового переплава, температурная зависимость вязкости которых выражается в виде параболы $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$.

Примером такой зависимости является флюс состава 65% CaF_2 + 30% Al_2O_3 + 5% CaO .

Данное уравнение для вышеуказанного флюса будет иметь вид

$$\lg \eta = a + b \cdot T^{-1} \cdot 10^3 + c \cdot T^{-2} \cdot 10^6. \quad (11)$$

Для нахождения коэффициентов a , b , c из системы уравнений (5) также используем только первое, но зато столько раз, сколько параметров уравнения (11) нужно определить. Поскольку параметров три, то первое уравнение из системы уравнений (5) нужно переписать три раза.

Для каждого уравнения устанавливаем свои пределы. Для этого используем рис. 2. Из него выбираем десять значений температуры от 1350 до 1575°C с интервалом 25°C. Каждому значению температуры на оси ординат находим соответствующее значение вязкости. Эти данные заносим в табл. 2. Так как выбранных уравнений три, то десять значений температуры нужно распределить на три части с разными пределами. Для первого уравнения пределы берём от 1 до 4, для второго — от 5 до 7 и для третьего — от 8 до 10.

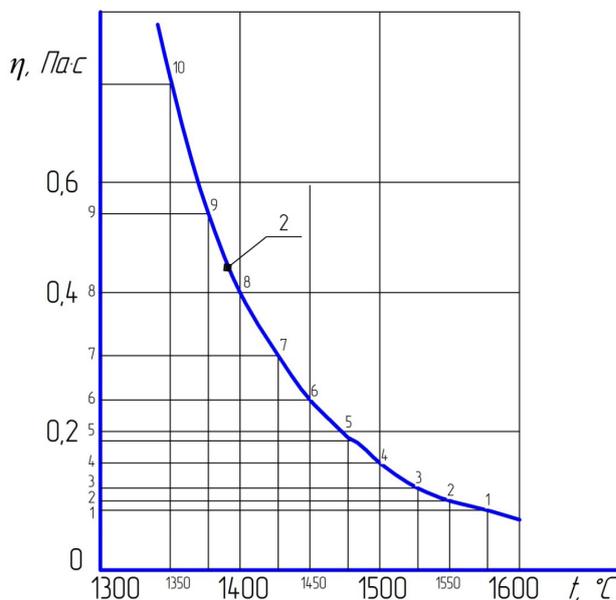


Рис. 2. Температурная зависимость вязкости флюса состава 65% CaF_2 + 30% Al_2O_3 + 5% CaO

Тогда получим следующую запись уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 4 \cdot a + b \sum_{k=1}^4 x_k + c \sum_{k=1}^4 x_k^2 &= \sum_{k=1}^4 y_k; \\ 3 \cdot a + b \sum_{k=5}^7 x_k + c \sum_{k=5}^7 x_k^2 &= \sum_{k=5}^7 y_k; \\ 3 \cdot a + b \sum_{k=8}^{10} x_k + c \sum_{k=8}^{10} x_k^2 &= \sum_{k=8}^{10} y_k \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) находим суммарные значения с разными пределами x_k , x_k^2 и y_k для трёх уравнений.

Для первого уравнения пределы берём от 1 до 4.

$$\sum_{k=1}^4 x_k = 0,541 + 0,548 + 0,556 + 0,564 = 2,109,$$

$$\sum_{k=1}^4 x_k^2 = 0,293 + 0,300 + 0,309 + 0,318 = 1,220,$$

Таблица 2

Зависимость вязкости от температуры флюса состава 65% CaF_2 + 30% Al_2O_3 + 5% CaO

k	t, °C	T, K	$T^{-1} \cdot 10^3 = x_k$	$T^{-2} \cdot 10^6$	x_k^2	η	Экспер. $\lg \eta = y_k$	Расчет. $\lg \eta = y_k$
1	1575	1848	0,541	0,293	0,293	0,082	-1,086	-1,088
2	1550	1823	0,548	0,300	0,300	0,100	-1,000	1,002
3	1525	1798	0,556	0,309	0,309	0,123	-0,910	0,905
4	1500	1773	0,564	0,318	0,318	0,154	-0,812	-0,808
5	1475	1748	0,572	0,3277	0,327	0,191	-0,719	-0,710
6	1450	1723	0,580	0,336	0,336	0,250	-0,602	-0,607
7	1425	1698	0,589	0,347	0,347	0,314	-0,503	-0,503
8	1400	1673	0,598	0,357	0,358	0,404	-0,394	-0,394
9	1375	1648	0,607	0,368	0,368	0,514	-0,289	0,285
10	1350	1623	0,616	0,380	0,379	0,668	-0,175	0,176

$$\sum_{k=1}^4 y_k = -1,086 - 1,000 - 0,910 - 0,812 = -3,808.$$

Для второго уравнения пределы берем от 5 до 7.

$$\sum_{k=5}^7 x_k = 0,572 + 0,580 + 0,589 = 1,741,$$

$$\sum_{k=5}^7 x_k^2 = 0,327 + 0,336 + 0,347 = 1,010,$$

$$\sum_{k=5}^7 y_k = -0,719 - 0,602 - 0,503 = -1,824.$$

Для третьего уравнения пределы берем от 8 до 10.

$$\sum_{k=8}^{10} x_k = 0,598 + 0,607 + 0,616 = 1,821,$$

$$\sum_{k=8}^{10} x_k^2 = 0,358 + 0,368 + 0,379 = 1,105,$$

$$\sum_{k=8}^{10} y_k = -0,354 - 0,289 - 0,175 = -0,858.$$

Полученные суммарные значения с разными пределами x_k , x_k^2 и y_k подставляем в уравнение (12) и получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} 4 \cdot a + 2,209 \cdot b + 1,220 \cdot c &= -3,808 \\ 3 \cdot a + 1,741 \cdot b + 1,010 \cdot c &= -1,824 \\ 3 \cdot a + 1,821 \cdot b + 1,105 \cdot c &= -0,858 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решая систему уравнений (13), находим значения коэффициентов $a = -7,91$; $b = 13,0$; $c = -0,722$.

Тогда параболическое уравнение логарифма вязкости от температуры для флюса системы 65 % CaF_2 + 30 % Al_2O_3 + 5 % CaO будет

$$\lg \eta = -7,91 + 13,0 \cdot T^{-1} \cdot 10^3 - 0,722 \cdot T^{-2} \cdot 10^6. \quad (14)$$

Значения $\lg \eta$, полученные экспериментальными и расчётными методами от 1350 до 1575°C

с интервалом 25°C для расплавленного флюса состава 65 % CaF_2 + 30 % Al_2O_3 + 5 % CaO приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что разница в значениях вязкости, определённая разными способами, составляет $\pm 1,5$ %.

Предложенный расчетный метод позволяет определять вязкость расплавленных флюсов для электрошлакового переплава при различных температурах без проведения экспериментов. Он может быть использован для более углубленного изучения процессов при электрошлаковом переплаве.

Библиографический список

1. Лопаев, Б. Е. Физико-химические свойства шлаковых систем, используемых для электрошлакового переплава : моногр. / Б. Е. Лопаев, Е. Н. Еремин. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. — 192 с.
2. Лопаев, Б. Е. Основные теории вязкости расплавленных шлаков и её роль в электрошлаковых процессах / Б. Е. Лопаев, А. А. Бегма. — Омск, 2010. — 13 с. — Деп. в ВИНИТИ 08.04.2010, № 199.
3. Лопаев, Б. Е. Аналитический расчет удельной электропроводности расплавленных флюсов для электрошлакового переплава / Б. Е. Лопаев, Е. Н. Еремин, Д. Г. Кноль, И. С. Галактионов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 3 (113). — С. 128–131.
4. Есин, О. А. Физическая химия пирометаллургических процессов. В 2 ч. Ч. 2 / О. А. Есин, П. В. Гельд. — 2-е изд. — М. : Металлургия, 1966. — 703 с.
5. Мелентьев, П. В. Приближённые вычисления / П. В. Мелентьев. — М. : Гос. изд-во физико-химической лит., 1962. — 388 с.

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

КАГАРМАНОВ Игорь Игоревич, студент гр. М-123 машиностроительного института.
Адрес для переписки: ig94rus@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16.12.2015 г.

© Б. Е. Лопаев, И. И. Кагарманов

Книжная полка

621.791/М74

Мозговой, И. В. Сварка винипласта : моногр. / И. В. Мозговой. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 255 с.

Рассмотрены вопросы технологии сварки изделий из винипласта и использования энергии силового ультразвука в сочетании с процессами пластификации соединяемых поверхностей растворителями винипласта — тетрагидрофураном, циклогексаном и диоксаном. При ультразвуковой сварке винипласта плавление материала в зоне сварки крайне неравномерное, сопровождается появлением очагов деструкции, существенно снижающих прочностные показатели соединений, их герметичность и эксплуатационные показатели. Пластификация винипласта в зоне сварки устраняет деструкцию материала, повышает прочность швов и срок эксплуатации в условиях воздействия кислот и щелочей до 18–20 лет.

Монография рекомендована специалистам, исследователям, аспирантам и студентам, занимающимся технологиями сварки изделий из пластмасс.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫСОТЫ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССИОННЫХ КОЛЕЦ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАЗБРАКОВКИ. Часть 2

В статье обосновано, что отклонение формы торцовых поверхностей поршневых компрессионных колец необходимо оценивать суммарным отклонением от параллельности и плоскостности (ЕСАЕ) при совместном определении отклонений от номинального размера высоты кольца, присутствующей выпуклости и взаимного расположения его торцовых поверхностей относительно комплекта основных конструкторских баз, что осуществимо с применением предложенного устройства для контроля взаимного расположения поверхностей. Выведено правило определения предельных размеров размерного элемента, по которым должен проводиться прием годных изделий с учетом влияния допускаемой погрешности измерений ($\delta_{изм}$) на результат разбраковки, учитывая, что отклонения формы отсчитываются от базовой поверхности формы и в зависимости от вида поверхности оцениваются комплексными и элементными параметрами геометрической точности формы.

Ключевые слова: поршневое компрессионное кольцо, двигатель внутреннего сгорания, одноступенчатый выборочный контроль, отклонение формы и расположение поверхностей, вероятностные ошибки I и II рода.

Часть 1 опубликована в журнале Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии — 2015. — № 3 (143). — С. 104–110.

Введение. Все размеры с поставленными нормами точности подразделяются на элементные, или сопрягаемые, образующие посадку с сопрягаемой деталью, и координирующие, определяющие положение геометрических элементов детали и присоединяемых деталей относительно комплекта основных конструкторских баз. В зависимости от назначения соединений все конструктивные элементы деталей с сопрягаемыми поверхностями, имеющими одинаковый номинальный размер, сохраняют полную неподвижность или обеспечивают возможность движения друг относительно друга. Поскольку действительные размеры годных изделий в партии деталей, изготовленные по одним и тем же чертежам, могут колебаться между заданными предельными размерами, значения зазоров или натягов в сопряжении могут колебаться в зависимости от изменения значений действительных размеров сопрягаемых поверхностей деталей с учетом отклонений формы реального профиля или поверхности контролируемого изделия.

Реальная форма поверхностей геометрических элементов детали делает размерный элемент переменным, ограниченным двумя значениями — наибольшим и наименьшим. Допуск размерного элемента ограничивает отклонение формы его поверхностей, а допуск координирующего размера —

отклонения расположения образующих его размерных элементов. Неизбежность искажения формы наружных и внутренних цилиндрических поверхностей изделий в процессе их изготовления вызывает негативные последствия искажения формы плоских поверхностей, из чего следует, что реальное расположение размерных элементов деталей делает переменными координирующие размеры, которые также можно ограничить двумя значениями — наибольшим и наименьшим, измеренными как расстояния между прилегающими к реальным поверхностям или их осям в направлениях, определяемых конструкторскими базами по ГОСТ 21495-76. Отклонения расположения не включают расположение формы рассматриваемой поверхности за счет использования прилегающих поверхностей, при этом исключения составляют радиальное и торцовое биение.

Точность измерений геометрических величин деталей зависит от точности применяемых средств измерений. Наличие погрешности измерений влияет на достоверность результатов измерительного контроля и может привести к появлению областей вероятностных ошибок I и II рода в случае ошибочного принятия некоторых бракованных изделий годными (α_1), а некоторых годных — бракованными (β_2), искажению действительного поля

рассеивания кривой распределения совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$, полученной посредством объединения композиций однородных выборочных совокупностей $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшего и наименьшего размера размерного элемента при наложении на нее кривых распределения погрешностей измерений $p_1(III \max, \sigma_1, \bar{x}_1)$, $p_2(III \min, \sigma_2, \bar{x}_2)$ с мгновенными центрами рассеивания $a_{\Delta \bar{x}_{\max}}$, $a_{\Delta \bar{x}_{\min}}$, совпадающими с приемочными границами контролируемого размерного элемента изделия. Соответственно, необходимым условием выбора универсальных средств измерений и назначения допустимой погрешности измерений ($\delta_{изм}$) является определение предельных размеров изделий, по которым производится приемочный контроль и прогнозирование вероятностного появления погрешностей забраковки при определении процентного соотношения неправильно принятых (α_1), неправильно забракованных (β_2) деталей и вероятностного предельного значения (с) выхода размера за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей учитывая, что отклонения формы уменьшают интервал допуска действительных размеров на значение допуска формы, отсчитываются от базовой поверхности формы и в зависимости от вида поверхности оцениваются комплексными и элементными параметрами геометрической точности формы.

Определение расположения приемочных границ в случае смещения мгновенного центра рассеивания кривой распределения совокупности средней результатов измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых колец. По ГОСТ 25346-2013 за наибольший допустимый размер вала принимается диаметр описанного прилегающего цилиндра наименьшего возможного радиуса, который бы касался наиболее выступающих точек выявленной цилиндрической поверхности вращения, учитывая, что данный диаметр должен быть не больше предела максимума материала или верхнего предельного размера вала. Соответственно, за наименьший допустимый размер отверстия принимается диаметр вписанного цилиндра наибольшего возможного радиуса, который касался бы наиболее выступающих точек выявленной внутренней цилиндрической поверхности вращения при условии, что данный диаметр должен быть не меньше предела максимума материала или нижнего предельного размера отверстия.

Поскольку отклонение формы реальной поверхности относительно номинальной, заданной чертежом по ГОСТ 26642-81, оценивается наибольшим расстоянием от точек выявленного размерного элемента по нормали к номинальной прилегающей поверхности в пределах нормируемого участка, наибольший действительный размер отверстия определяется отклонениями формы, ограниченными допуском формы $D_{\Delta \max} = D_{\Delta \min} + 2\Delta_{\phi} D$, учитывая, что за наибольший допустимый размер отверстия принимается размер, измеренный по двухконтактной схеме универсальным средством измерений, который должен быть не больше предела минимума материала или верхнего предельного размера отверстия $D_{\Delta \max} \leq D_{\max}$.

Наименьший действительный размер вала определяется отклонениями формы, ограниченными допуском формы $d_{\Delta \min} = d_{\Delta \max} - 2\Delta_{\phi} d$, при условии, что за наименьший допустимый размер вала принимается размер, измеренный по двух-

контактной схеме универсальным средством измерений, который должен быть не меньше предела минимума материала или нижнего предельного размера вала $d_{\Delta \min} \geq d_{\min}$ [1].

Для исключения первичных погрешностей измерений в совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$, полученной посредством объединения композиций однородных выборочных совокупностей $p_1(\mu, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшего и наименьшего размеров размерного элемента изделия с объемом выборок n_j в партии изделий N необходимо при определении значений размеров, по которым производится прием годных изделий с учетом допустимой погрешности измерений ($\delta_{изм}$) на результат разбраковки при вероятностном определении количества неправильно принятых (α_1), неправильно забракованных деталей (β_2) и вероятностном предельном значении (с) выхода размера за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей учитывать, что отклонения формы отсчитываются от базовой поверхности формы и в зависимости от вида поверхности оцениваются комплексными и элементными параметрами геометрической точности формы, а также уменьшают интервал допуска действительных размеров на значение допуска формы при рассмотрении определений проходного и непроходного пределов изделия, применяемых при контроле предельными калибрами, данных по ГОСТ 25346-2013 с позиции пределов максимума и минимума материала:

$$\begin{aligned} d \lim_{D \min} &\leq d_{\min} + 2\Delta_{\phi} d, \\ d_{D \min} &\geq d_{\min}, \quad d_{D \max} \leq d_{\max}; \\ D \lim_{D \min} &\geq D_{\max} - 2\Delta_{\phi} D, \\ D_{D \min} &\geq D_{\min}, \quad D_{D \max} \leq D_{\max}. \end{aligned}$$

Уменьшение интервала допуска действительных размеров изделия относительно непроходного предела на удвоенное значение вероятностного предельного выхода размера (с) за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей при известной точности технологического процесса либо на значение допустимой погрешности измерений ($\delta_{изм}$) при неизвестной точности технологического процесса приведет к изменению значений зазоров и натягов в сопряжениях вследствие изменения допуска формы реальных поверхностей:

$$\begin{aligned} S_{\phi} &= D_{EI+c}^{ES-c} - d_{ei+c}^{es-c} = D_{EI}^{ES-T_{\phi}D} - d_{ei+T_{\phi}d}^{es}, \\ N_{\phi} &= d_{ei+c}^{es-c} - D_{EI+c}^{ES-c} = d_{ei+T_{\phi}d}^{es} - D_{EI}^{ES-T_{\phi}D}, \\ S_{\phi} &= D_{EI+\frac{\delta}{2}}^{ES-\frac{\delta}{2}} - d_{ei+\frac{\delta}{2}}^{es-\frac{\delta}{2}} = D_{EI}^{ES-T_{\phi}D} - d_{ei+T_{\phi}d}^{es}, \\ N_{\phi} &= d_{ei+\frac{\delta}{2}}^{es-\frac{\delta}{2}} - D_{EI+\frac{\delta}{2}}^{ES-\frac{\delta}{2}} = d_{ei+T_{\phi}d}^{es} - D_{EI}^{ES-T_{\phi}D}. \end{aligned}$$

Расширение интервала допуска размера возможно за счет уменьшения допуска формы, ограничивающего отклонения формы поверхностей, значение которого не должно превышать соотношений, установленных по ГОСТ 24643-81 между допусками формы и расположения поверхностей и допуском размера изделия.

В генеральной совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$, полученной посредством объединения однородных выборочных совокупностей $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых колец, вероятностное предельное значение выхода размера за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей $c=0,001$ мм, исходя из установленной точности технологического процесса изготовления поршневых компрессионных колец, составляющей 4 % брака относительно обеих приемочных границ интервала допуска размера высоты поршневых компрессионных колец ($\delta_{\text{брак}} = 4\%$), с технологическим рассеиванием результатов измерений наибольшей и наименьшей высоты колец $\varepsilon = \pm 1,2\%$, допустимом выходе действительного размера за каждую границу интервала допуска $\frac{c}{\Delta_{\text{изо}}} = 10\%$ по ГОСТ 8.051-81, относительной погрешности метода измерений $A_{\text{мет}}(\sigma) = 16\%$ и зоне допуска $\frac{IT}{\sigma_{\text{max}}} = 4$, где $\Delta_{\text{изо}}$ — допускаемая погрешность изготовления контролируемых колец, σ_{max} — среднее квадратическое отклонение погрешности измерений, установленной на изготовление поршневых колец.

Вероятностное предельное значение $c=0,001$ мм выхода размера за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей не превышает половину допускаемой погрешности измерений $\frac{\delta_{\text{изм}}}{2} = 1,5$ мм, что не противоречит положениям ГОСТ 8.051-81.

В однородных выборочных совокупностях $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец бензиновых двигателей ЗМЗ-402.10, ЗМЗ-4062.10 с номинальным диаметром рабочей поверхности в рабочем состоянии $\varnothing 92$ мм, с объемом выборок $n_1 = n_2 = 51$ в партии изделий $N = 102$ с учетом выходящих значений за пределы интервала допуска размера, принятых в число годных, действительные размеры находятся близко к установленным документацией по техническому обслуживанию и ремонту, предельным размерам их высоты $b_1 = b_2 = (2_{-0,012})$ мм. Детали, у которых размеры находятся близко к предельным отклонениям допуска размера, могут быть неправильно оценены, то есть забракованы, а бракованные — пропущены как годные. Такое сочетание погрешности измерений и истинного размера контролируемой детали является случайным событием, при котором погрешность измерений накладывается на погрешность изготовления детали и оказывает влияние на достоверность результатов измерительного контроля.

Для устранения влияния случайных погрешностей годность предельных размеров высоты поршневых компрессионных колец бензиновых двигателей ЗМЗ-402.10 и ЗМЗ-4062.10 необходимо определять относительно нормированного по ГОСТ 25346-2013 значения производственного допуска $T_{\text{np}} = IT - 2c = 0,012 - 2 \cdot 0,001 = 0,010$ мм при смещении внутрь приемочной границы относительно непроходного предела, определяемого нижним предельным размером высоты поршневых компрессионных колец $b_{1\text{min}} = b_{2\text{min}} = 1,988$ мм на удвоенное значение вероятностного предельного выхода размера $2c=0,002$ мм за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей.

Выявление по гипергеометрическому закону проведения вероятностной процедуры одноступенчатого выборочного контроля вероятностных ошибок I и II рода в контролируемой партии изделий. По ГОСТ 8.051-81 среди принятых деталей, размеры которых установлены интервалами допусков со 2 по 7 качества, допускается наличие от перепроверенной партии до 5 % изделий с размерами, выходящими за приемочные границы на значение, не превышающее половину допускаемой погрешности измерений.

При уровне дефектности приемочного контроля $q_0 = 0,05$ в перепроверенной партии контролируемых поршневых компрессионных колец допустимое число дефектных изделий по ГОСТ Р ИСО 2859-1-2007 [2] составляет $D_n = N \cdot q_0 = 102 \cdot 0,05 = 5$ штук.

Поскольку точность технологического процесса изготовления поршневых компрессионных колец в контролируемой партии изделий составляет $\delta_{\text{брак}} = 4\%$ брака относительно обеих приемочных границ, браковочный уровень дефектности $q_n = 0,04$ с допустимым числом дефектных изделий $D_x = N \cdot q_n = 102 \cdot 0,04 = 4$ штук не превышает установленного по ГОСТ 8.051-81 уровня дефектности приемочного контроля $q_n < q_0$, что свидетельствует о назначении на размер высоты поршневых компрессионных колец класса допуска, установленного со 2 по 7 качества.

Полагая изотермическое течение газа по трехкольцевому лабиринтному дифференциальному уплотнению, учитывая влияние раннего и позднего зажигания на компрессионные свойства поршневых колец, а также тот факт, что коэффициент линейного расширения алюминиевых поршней в два раза выше, чем у чугунных поршневых компрессионных колец, для уменьшения влияния погрешности измерений на достоверность результатов измерительного контроля на размер высоты поршневых компрессионных колец бензиновых двигателей ЗМЗ-402.10, ЗМЗ-4062.10 необходимо назначение класса допуска 2h7 в системе вала относительно нормированного по ГОСТ 25346-2013 значения производственного допуска $T_{\text{np}} = 0,010$ мм для обеспечения его постоянства в сопряжениях с торцами поршневых канавок, избежания появления областей вероятностных ошибок I и II рода в случае ошибочного принятия некоторых бракованных изделий годными (α_1), а некоторых годных — бракованными (β_2).

Назначение посадок в системе вала на сопряжения верхнего и нижнего поршневых компрессионных колец с торцами поршневых канавок необходимо осуществлять путем подбора на размер высоты поршневых канавок классов допусков отверстий из числа рекомендуемых по ГОСТ 25347-2013 при соблюдении условий взаимозаменяемости сопрягаемых деталей. С такой же точностью требуется обеспечение постоянства размера высоты поршневых компрессионных колец с номинальным диаметром рабочей поверхности в рабочем состоянии $\varnothing 92$ мм в сопряжениях с торцами поршневых канавок в конструкциях бензиновых двигателей ЗМЗ-511.10, ЗМЗ-513.10, ЗМЗ-5234.10, поскольку сопрягаемые размеры, установленные на высоту поршневых компрессионных колец и торцев поршневых канавок в этих моделях двигателей внутреннего сгорания входят по ГОСТ 25346-2013 в один и тот же основной интервал номинальных размеров и установлены с назначением тех же предельных отклонений, что в конструкциях бензиновых двигателей ЗМЗ-402.10, ЗМЗ-4062.10.

Изнашивание поршневого компрессионно-го кольца происходит по его рабочей и торцовым поверхностям в результате трения о нагретые от соприкосновения с горячими газами поверхность цилиндра и торцы поршневых канавок, а отклонения формы отсчитываются от базовой поверхности формы и в зависимости от вида поверхности оцениваются комплексными и элементными параметрами геометрической точности формы. Соответственно, отклонения формы и расположения торцовых поверхностей поршневых компрессионных колец необходимо оценивать суммарным отклонением от параллельности и плоскостности (ЕСАЕ) при совместном определении отклонений от номинального размера высоты контролируемых колец, присутствующей выпуклости кольца и взаимного расположения его торцовых поверхностей относительно комплекта основных конструкторских баз.

Координата середины действительного поля рассеивания результатов измерительного контроля определялась с учетом влияния первичной погрешности смещения ее мгновенного центра рассеивания относительно координаты середины интервала допуска контролируемого размерного элемента

$$Em(\bar{x}, \sigma) = Ec(IT) \pm a_{\Delta\bar{x}},$$

где $a_{\Delta\bar{x}} = \theta_{(\bar{x}, \sigma)} \cdot \frac{IT}{2}$ — смещение мгновенного центра рассеивания кривой нормального закона распределения; $\theta_{(\bar{x}, \sigma)}$ — коэффициент относительной асимметрии; $Ec(IT)$ — координата середины интервала допуска контролируемого размерного элемента.

Координата середины поля рассеивания однородной выборочной совокупности $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наименьшей высоты поршневых компрессионных колец $Em(\bar{x}_2, \sigma_{\min}) = -0,012$ мм с коэффициентом относительной асимметрии $\theta_{(\bar{x}_2, \sigma_{\min})} = \frac{Em(\bar{x}_2, \sigma_{\min}) - Ec(Tb)}{0,5 \cdot Tb} = \frac{-0,012 - (-0,006)}{0,5 \cdot Tb} = -1$. Смещение мгновенного центра рассеивания $a_{\Delta\bar{x}_2} = \frac{0,006}{2} = -0,003$ мм однородной выборочной совокупности $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наименьшей высоты поршневых компрессионных колец относительно координаты середины интервала допуска их высоты $Ec(Tb) = -0,006$ мм влияет на превышение в два раза присутствующей выпуклости колец в контролируемой выборке p_2 относительно элементного отклонения от плоскостности $EFE_{p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)} = 60\% \cdot Tb_{p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)} = 60\% \cdot 2 \cdot Tb = 120\% \cdot Tb$, исходя из нормальной геометрической точности, установленной по ГОСТ 24643-81 на соотношения между допуском размера и элементным отклонением формы.

Координата середины поля рассеивания кривой распределения совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$, полученной посредством объединения однородных выборочных совокупностей $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец составляет $Em(\bar{x}_0, \sigma_{\bar{x}}) = -0,008$ мм с коэффициентом относительной асимметрии $\theta_{(\bar{x}_0, \sigma_{\bar{x}})} = \frac{Em(\bar{x}_0, \sigma_{\bar{x}}) - Ec(Tb)}{0,5 \cdot Tb} = \frac{-0,008 - (-0,006)}{0,5 \cdot Tb} = -0,3$. Установленное смещение мгновенного центра рассеивания $a_{\Delta\bar{x}_0} = Em(\bar{x}_0, \sigma_{\bar{x}}) - Ec(Tb) = \theta_{(\bar{x}_0, \sigma_{\bar{x}})} \cdot \frac{Tb}{2} = -0,002$ мм совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$ относительно

координаты середины интервала допуска размера высоты поршневых компрессионных колец $Ec(Tb) = -0,006$ мм влияет на превышение в 1,33 раза присутствующей выпуклости колец в партии изделий N относительно элементного отклонения от плоскостности $EFE_{p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)} = 60\% \cdot Tb_{p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)} = 60\% \cdot 1,33 \cdot Tb = 80\% \cdot Tb$, исходя из нормальной геометрической точности, установленной по ГОСТ 24643-81 на соотношения между допуском размера и элементным отклонением формы.

Смещения мгновенных центров рассеивания $a_{\Delta\bar{x}_0}$, $a_{\Delta\bar{x}_2}$ совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$ и однородной выборочной совокупности $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наименьшей высоты поршневых компрессионных колец, у которых установленная выпуклость значительно превышает элементное отклонение от плоскостности по ГОСТ 24643-81, свидетельствуют о невозможности выявления микрометром рычажным МР 25 по ГОСТ 4381-81 присутствующей выпуклости кольца и взаимного расположения его торцовых поверхностей относительно комплекта основных конструкторских баз при проведении измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец в 20–30 местах по периметру кольца в партии изделий.

Для исключения первичной погрешности смещения мгновенного центра рассеивания $a_{\Delta\bar{x}_0}$ совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$ годность предельных размеров высоты поршневых компрессионных колец бензиновых двигателей ЗМЗ-402.10, ЗМЗ-4062.10 при проведении приемочного контроля с прогнозированием вероятностного появления погрешностей разбраковки при определении процентного соотношения неправильно принятых (α_1), неправильно забракованных (β_2) деталей и вероятностного предельного значения (c) выхода размера за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей необходимо определять относительно нормированного по ГОСТ 25346-2013 значения производственного допуска $Tb_{np} = ITb - 2c = 0,012 - 2 \cdot 0,001 = 0,010$ мм при смещении внутрь приемочной границы относительно непроходного предела, соответствующего нижнему предельному размеру их высоты $b_{Imin} = b_{2min} = 1,988$ мм, на удвоенное значение вероятностного предельного выхода размера $2c = 0,002$ мм за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей, учитывая, что $2 \cdot c = a_{\Delta\bar{x}_0}$.

Нахождение вероятностных ошибок I и II рода проведено по гипергеометрическому закону распределения с вероятностью, что в выборках $n_1 = n_2 = 51$ окажется s дефектных изделий по результатам проведения измерительного контроля предельных размеров высоты поршневых колец в партии изделий $N = 102$, из которых D_x являются дефектными, с учетом выходящих значений за пределы интервала допуска размера, принятых в число годных

$$P(N, n) = \frac{C_{D_x}^s \cdot C_{N-D_x}^{n-s}}{C_N^n},$$

где C_i^j — число сочетаний из $i = D_x$, $N - D_x$, N элементов по $j = s$, $n - s$, n элементов.

Вероятность принятия при одноступенчатом контроле партии изделий N с приемочным числом C_{0p} приемочном и браковочном уровнях дефектности q_p , q_n с числом дефектных изделий $D_x \leq C_0$

$$P(q, C_0, N) = P\left(D_x \leq \frac{C_0}{q_0}\right) =$$

$$= \sum_{s=0}^{s=C_0} P\left(D_x = \frac{s}{q_n}\right) = \sum_{s=0}^{s=C_0} \frac{C_{D_x}^s \cdot C_{N-D_x}^{n-s}}{C_N^n}.$$

По результатам проведения измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых колец при общем числе произведенных измерений в партии изделий $N=102$ с учетом выходящих значений за пределы интервала допуска размера, принятых в число годных, с приемочным числом $C_0 = 5$, приемочным и браковочным уровнями дефектности $q_0 = 0,05$, $q_n = 0,04$, вероятность появления ошибки I рода в случае ошибочного принятия некоторых бракованных изделий годными

$$\alpha_1 = 1 - P(q, C_0, N) = 1 - \sum_{s=0}^{s=C_0} \frac{C_{D_x}^s \cdot C_{N-D_x}^{n-s}}{C_N^n} =$$

$$= 1 - \frac{(C_4^0 \cdot C_{98}^{51} + C_4^1 \cdot C_{98}^{50} + C_4^2 \cdot C_{98}^{49} + C_4^3 \cdot C_{98}^{48} + C_4^4 \cdot C_{98}^{47} + C_4^5 \cdot C_{98}^{46})}{C_{102}^{51}} =$$

$$= 0,9 \%,$$

при отсутствии появления в контролируемой партии деталей вероятностной ошибки II рода

$$\beta_2 = 1 - P(q, C_0, N) = \sum_{s=0}^{s=C_0} \frac{C_{D_x}^s \cdot C_{N-D_x}^{n-s}}{C_N^n} =$$

$$= 1 - \frac{(C_5^0 \cdot C_{97}^{51} + C_5^1 \cdot C_{97}^{50} + C_5^2 \cdot C_{97}^{49} + C_5^3 \cdot C_{97}^{48} + C_5^4 \cdot C_{97}^{47} + C_5^5 \cdot C_{97}^{46})}{C_{102}^{51}} =$$

$$= 0 \%.$$

Поскольку случайная величина $x \in N(\bar{x}_0, \sigma_{\bar{x}})$ не принимает значений, которые бы по абсолютной величине отличались более чем $3 \cdot \sigma$ от среднего арифметического значения \bar{x} в пределах границ доверительного интервала $\bar{x}_0 - t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\sqrt{N}} \leq x \leq \bar{x}_0 + t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\sqrt{N}}$ для двусторонней вероятности $P\left(\left(\chi^2 > \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2\right) \cup \left(\chi^2 < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2\right)\right) = \alpha$

и отличается от своего среднего арифметического значения \bar{x}_0 не более чем $P(|x - \bar{x}_0| \leq \varepsilon) = \int_{\bar{x}_0 - \varepsilon}^{\bar{x}_0 + \varepsilon} p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0) d\bar{x} = 2 \cdot F\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_{\bar{x}}}\right)$, кривые распределения плотностей вероятности погрешностей измерений $p_1(\PiГ \max, \sigma_1, \bar{x}_1)$, $p_2(\PiГ \min, \sigma_2, \bar{x}_2)$ наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец со средними арифметическими \bar{x}_1 , \bar{x}_2 и средними квадратическими отклонениями $\sigma_1 = \frac{\sigma_{\max}}{\sqrt{n_1}}$, $\sigma_2 = \frac{\sigma_{\min}}{\sqrt{n_2}}$, мгновенные центра которых совпадают с приемочными границами (ПГmax, ПГmin), установленными на изготовление колец

$$p_1(\PiГ \max, \sigma_1, \bar{x}_1) = \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\bar{x}_0 - \bar{x}_1)^2}{2(\sigma_1)^2}},$$

$$p_2(\PiГ \min, \sigma_2, \bar{x}_2) = \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\bar{x}_0 - \bar{x}_2)^2}{2(\sigma_2)^2}}$$

приводят к появлению вероятностной ошибки I рода над интервалами $(-\infty, \PiГ \min]$, $[\PiГ \max, \infty)$

$$\alpha_1 = \begin{cases} F\left(\frac{a - \PiГ \min}{\sigma_1}\right) - F(-\infty) = 0,5 - F\left(\frac{\PiГ \min - a}{\sigma_1}\right) \\ F(\infty) - F\left(\frac{\PiГ \max + a}{\sigma_2}\right) = 0,5 - F\left(\frac{\PiГ \max + a}{\sigma_2}\right) \end{cases},$$

где a — предельное распределение средних арифметических значений \bar{x}_1 , \bar{x}_2 совокупностей кривых распределения погрешностей измерений $p_1(\PiГ \max, \sigma_1, \bar{x}_1)$, $p_2(\PiГ \min, \sigma_2, \bar{x}_2)$ наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец с номинальным диаметром рабочей поверхности в рабочем состоянии $\varnothing 92$ мм при числе измерений в партии изделий $N = 102$ с учетом выходящих значений за пределы интервала допуска размера, принятых в число годных.

Из аргумента функции Лапласа

$$z_{0,5-\alpha_1} = \frac{\PiГ \min \pm a}{\sigma_1} = \frac{\PiГ \max \pm a}{\sigma_2}$$

следует, что

$$a = \begin{cases} \PiГ \max \pm z_{0,5-\alpha_1} \cdot \sigma_1; \\ \PiГ \min \pm z_{0,5-\alpha_1} \cdot \sigma_2. \end{cases}$$

В силу частичного подтверждения гипотезы о распределении совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$ и ее точечных оценок по ГОСТ 8.207-76 по закону Гаусса, центры группирования предельных совокупностей погрешностей измерений $p_1(\PiГ \max, \sigma_1, \bar{x}_1)$, $p_2(\PiГ \min, \sigma_2, \bar{x}_2)$ наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец определены относительно приемочных границ, соответствующих предельным отклонениям интервала допуска размера их высоты $a_{\PiГ \max} = (2 \pm 0,0004)$ мм, $a_{\PiГ \min} = (1,988 \pm 0,0004)$ мм.

Наложение кривых распределения погрешностей измерений $p_1(\PiГ \max, \sigma_1, \bar{x}_1)$, $p_2(\PiГ \min, \sigma_2, \bar{x}_2)$ наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец на кривую распределения совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$, полученной посредством объединения композиций однородных выборочных совокупностей $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец приводит к ее искажению вследствие влияния отклонения формы торцовых поверхностей колец с появлением области вероятностной ошибки I рода

$$p(\sigma_{\max}, \sigma_{\text{изм}}) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x - \bar{x}_0 - \PiГ \max - \PiГ \min)^2}{2\sigma_z^2}},$$

где $\sigma_z = \sqrt{\sigma_{\bar{x}}^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ среднее квадратическое отклонение искаженной кривой распределения совокупности средней $p(\sigma_{\max}, \sigma_{\text{изм}})$ результатов измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец.

На рис. 1 приведено распределение совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$, полученной посредством объединения композиций нормальных законов распределения $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец, предназначенных для установки с номинальным диаметром рабочей поверхности в рабочем состоянии $\varnothing 92$ мм в конструкциях бензиновых двигателей ЗМЗ-402.10, ЗМЗ-4062.10 с объемом выборок $n_1 = n_2 = 51$ в партии изделий $N = 102$ с учетом выходящих значений за пределы интервала допуска размера, принятых в число годных, а также однородные выборочные совокупности $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ с распределением значений середин интервалов (x_{jo}) от частоты попадания в каждый интервал (n_j).

Область вероятностной ошибки I рода на рис. 1 определена площадью S , ограниченной прямыми

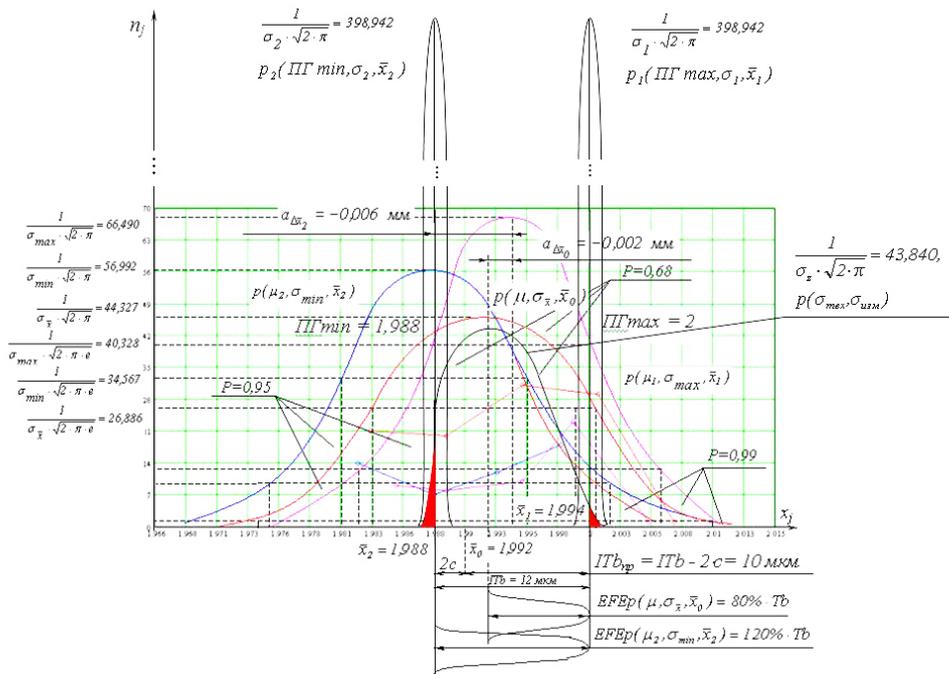


Рис. 1. Графическое распределение кривых распределения совокупности средней $p(\mu, \sigma_x, \bar{x}_0)$ и однородных выборочных совокупностей $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ и погрешностей измерений $p_1(\PiГ \max, \sigma_1, \bar{x}_1)$, $p_2(\PiГ \min, \sigma_2, \bar{x}_2)$ наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец

ми $\PiГ \max = 2$, $\PiГ \min = 1,988$ и горизонтальной асимптотой $y = 0$, на интервалах $(\PiГ \min - a, \PiГ \min] \cup [\PiГ \max, \PiГ \max + a)$ ниже искаженной кривой действительного поля рассеивания совокупности средней $p(\sigma_{\max}, \sigma_{\text{изм}})$ при наложении кривых распределения погрешностей измерений $p_1(\PiГ \max, \sigma_1, \bar{x}_1)$, $p_2(\PiГ \min, \sigma_2, \bar{x}_2)$ наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец с мгновенными центрами рассеивания $a_{\Delta \bar{x}_{\max}}$, $a_{\Delta \bar{x}_{\min}}$, совпадающими с приемочными границами размера высоты поршневых компрессионных колец на кривую распределения совокупности средней $p(\mu, \sigma_x, \bar{x}_0)$, полученной посредством объединения композиций однородных выборочных совокупностей $p_1(\mu_1, \sigma_{\max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{\min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец

$$\begin{aligned}
 S &= \iint_D dx dy = \int_{\PiГ \max}^{\PiГ \max + a} dx \int_0^{\PiГ \min} dy + \int_{\PiГ \min - a}^{\PiГ \min} dx \int_0^{\PiГ \min} dy = \\
 &= \int_{\PiГ \max}^{\PiГ \max + a} (y) \Big|_0^{\PiГ \min} p(\sigma_{\max}, \sigma_{\text{изм}}) dx + \int_{\PiГ \min - a}^{\PiГ \min} (y) \Big|_0^{\PiГ \min} p(\sigma_{\max}, \sigma_{\text{изм}}) dx = \\
 &= \int_{\PiГ \max}^{\PiГ \max + a} p(\sigma_{\max}, \sigma_{\text{изм}}) dx + \int_{\PiГ \min - a}^{\PiГ \min} p(\sigma_{\max}, \sigma_{\text{изм}}) dx = \\
 &= (\Phi(\PiГ \max + a) - \Phi(\PiГ \min - a)) - \\
 &\quad - (\Phi(\PiГ \max) - \Phi(\PiГ \min)).
 \end{aligned}$$

Устройство для контроля взаимного расположения поверхностей. В бензиновых двигателях внутреннего сгорания семейства ЗМЗ-402, 4062, 511, 513, 5234, выпускаемых ОАО «Заволжский моторный завод» и предназначенных для установки на грузовые автомобили повышенной проходимости типа ГАЗ-3307, ГАЗ-3308 «Садко», легковые автомобили среднего класса типа «Волга», автобусы малого класса завода «Павловский автобус» ПАЗ-3205,

ПАЗ-3206 [10–13], верхнее и нижнее разрезные поршневые компрессионные кольца вместе с маслосъемным кольцом представляют собой трехкольцевое лабиринтное дифференциальное уплотнение плавающего типа. В течение рабочего цикла давление газов в цилиндре и в пространстве за кольцом не постоянно, перемещение и вибрация колец в радиальном направлении приводит к существенному перераспределению давлений по периметру кольца, искажению действительной эпюры распределения радиальных давлений.

Установлено, что применение микрометра рычажного МР 25 по ГОСТ 4381-81 для проведения измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых колец в 20–30 местах по периметру кольца в партии изделий не позволяет дать полноценной оценки присутствующей выпуклости кольца, взаимному расположению его торцовых поверхностей относительно комплекта основных конструкторских баз, в том числе из-за влияния температурной погрешности.

В связи с тем, что отклонения формы и расположения торцовых поверхностей поршневых компрессионных колец необходимо оценивать суммарным отклонением от параллельности и плоскостности (ЕСАЕ) при совместном определении отклонений от номинального размера высоты контролируемых колец, присутствующей выпуклости кольца и взаимного расположения его торцовых поверхностей относительно комплекта основных конструкторских баз, для проведения измерительного контроля наибольшей и наименьшей высоты поршневых компрессионных колец, контроля плоскостности и параллельности их торцовых поверхностей предложено устройство для измерения взаимного расположения поверхностей [3], принципиальная схема которого предоставлена на рис. 2. Устройство содержит основание 1, на котором жестко зафиксирован с помощью болтовых соединений 2

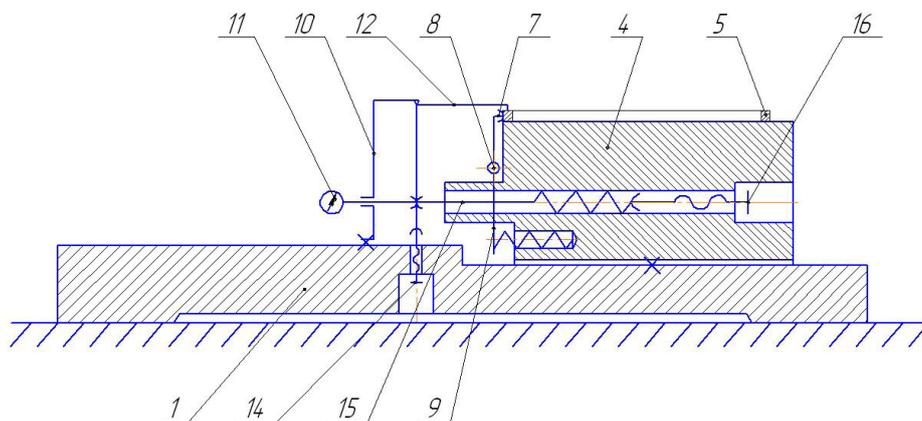


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для измерения взаимного расположения поверхностей

и дополнительных штифтов 3, корпус 4 с размещением контролируемой детали 5 на его верхней поверхности, являющейся элементом базирования контролируемой детали. На корпусе 4 жестко закреплен с помощью шпильки 6 упор 7 для ограничения положения контролируемой детали 5. В упоре 7 с помощью поворота на оси 8 установлена стойка 9, предназначенная для дополнительной фиксации контролируемой детали 5. На основании 1 жестко закреплен также кронштейн 10 с индикаторной головкой 11 и угловым рычагом 12, установленным с возможностью поворота вокруг оси 13, установленной в кронштейне. Угловой рычаг имеет три плеча, одно из которых контактирует с регулировочным винтом 14, индикаторной головкой 11 и торцевой поверхностью плунжера 15, расположенного в корпусе 4 соосно с индикаторной головкой 11 и подпружиненного с помощью регулировочного винта 16. Второе и третье плечи углового рычага 12 расположены параллельно оси плунжера 15. Второе плечо углового рычага расположено с возможностью контактирования с торцевой поверхностью контролируемой детали 5 и регулировочным винтом 17.

Для определения взаимного расположения торцевых поверхностей контролируемого поршневого кольца перед измерением необходимо произвести настройку измерительного устройства на размер номинальной высоты контролируемого поршневого кольца с помощью плоскопараллельных концевых мер длины (ГОСТ 9038-90).

Стрелки индикаторной головки 11 устанавливают на ноль регулированием положения углового рычага 12 с помощью винтов 14 и 17. Затем создают регулировочным винтом 16 необходимое измерительное усилие, приводя в соприкосновение торец плунжера 15 с плечом углового рычага 12. На верхнюю плоскую поверхность корпуса 4 после настройки измерительного устройства устанавливается контролируемое кольцо 5. После фиксации положения кольца 5 упором 7 и стойкой 9 относительно установочной поверхности корпуса 4, приводят в соприкосновение измерительную торцевую поверхность контролируемого кольца 5 с плечом углового рычага 12. Отклонение измеряемой высоты поршневого кольца от номинального значения передается через угловой рычаг 12 на индикаторную головку 11. Затем поворачивают контролируемое поршневое кольцо на установочной поверхности корпуса 4 на 180°C , приводят в соприкосновение

измерительную торцевую поверхность поршневого кольца с плечом углового рычага 12 и вновь фиксируют на индикаторной головке 11 отклонение от номинального значения высоты поршневого кольца во второй точке. По максимальному значению отклонения от номинальной высоты поршневого кольца ($EFE = b_{max}$) судят о присутствующей плоскостности его торцевых поверхностей. Отклонение от параллельности взаимного расположения торцевых поверхностей контролируемого поршневого кольца 5 определяется разностью между максимальными и минимальными действительными значениями высоты поршневого кольца 5 ($EPA = b_{max} - b_{min}$) с учетом установленных отклонений от номинального размера его высоты.

Заключение. Доказано, что отклонение формы торцевых поверхностей поршневых компрессионных колец необходимо оценивать суммарным отклонением от параллельности и плоскостности ($ECAE$) при совместном определении отклонений от номинального размера высоты кольца, присутствующей выпуклости и взаимного расположения его торцевых поверхностей относительно комплекта основных конструкторских баз, что осуществимо с применением предложенного устройства для контроля взаимного расположения поверхностей.

В контролируемой партии поршневых компрессионных колец по гипергеометрическому закону проведения вероятностной процедуры одноступенчатого выборочного контроля установлено присутствие вероятностной ошибки I рода $\alpha_1 = 0,9\%$ по причине невозможности микрометром рычажного МР 25 по ГОСТ 4381-81 установить присутствующую выпуклость кольца и взаимное расположение его торцевых поверхностей относительно комплекта основных конструкторских баз, что влияет на ошибочное принятие некоторых годных изделий бракованными.

Для исключения первичных погрешностей измерений в совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$, полученной посредством объединения композиций однородных выборочных совокупностей $p_1(\mu_1, \sigma_{max}, \bar{x}_1)$, $p_2(\mu_2, \sigma_{min}, \bar{x}_2)$ результатов измерительного контроля наибольшего и наименьшего размеров размерного элемента изделия с объемом выборок n_j в партии изделий N выведено правило определения предельных размеров, по которым должен проводиться приемочный контроль с учетом влияния допускаемой погрешности измерений ($\delta_{изм}$) на результат разбраковки при вероятностном

определении количества неправильно принятых (α_1), неправильно забракованных деталей (β_2) и вероятностном предельном значении (c) выхода размера за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей, учитывая, что отклонения формы отсчитываются от базовой поверхности формы и в зависимости от вида поверхности оцениваются комплексными и элементными параметрами геометрической точности формы.

Полагая изотермическое течение газа по трехкольцевому лабиринтному дифференциальному уплотнению, доказано, что для уменьшения влияния погрешности измерений на достоверность результатов измерительного контроля, избежания смещения мгновенного центра рассеивания $a_{\Delta\bar{x}_0}$ и искажения кривой распределения совокупности средней $p(\mu, \sigma_{\bar{x}}, \bar{x}_0)$, годность предельных размеров высоты поршневых компрессионных колец бензиновых двигателей ЗМЗ-402.10, ЗМЗ-4062.10 при выполнении приемочного контроля и прогнозирования вероятностного появления погрешностей разбраковки необходимо определять относительно нормированного по ГОСТ 25346-2013 значения производственного допуска $Tb_{np} = 0,010$ мм, при смещении внутрь приемочной границы относительно непроходного предела, на удвоенное значение вероятностного предельного выхода размера $2c=0,002$ мм за каждую границу интервала допуска у неправильно принятых бракованных деталей с назначением

на размер высоты поршневых компрессионных колец класса допуска 2h7 в системе вала.

Библиографический список

1. Чигрик, Н. Н. Исследование влияния погрешности отклонения формы сопрягаемых поверхностей деталей цилиндра-поршневой группы автомобильного двигателя ЗМЗ-511.10 при селективной сборке на точность элементных размеров / Н. Н. Чигрик // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 3 (123). — С. 124–135.
2. ГОСТ Р ИСО 2859-1-2007. Статистические методы. Процедура выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 1. Планы выборочного контроля последовательных партий на основе приемлемого уровня качества. — Введ. 2007-06-01. — М.: Стандартинформ, 2008. — 101 с.
3. Пат. 135407 Российская Федерация МПК G01B5/24. Устройство для взаимного расположения поверхностей / Н. Н. Чигрик; заявитель и патентообладатель Н. Н. Чигрик; заявл. 16.07.13.; опубл. 10.12.13. — № 2013133086/28(049447), Бюл. № 34. — 3 с.

ЧИГРИК Надежда Николаевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующая лабораторией кабинета метрологии, преподаватель спецдисциплин.

Адрес для переписки: ChigrikNadya@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 01.07.2015 г.

© Н. Н. Чигрик

УДК 621.9

**И. А. БУГАЙ
Е. В. ВАСИЛЬЕВ
М. В. ВАСИЛЬЕВА
А. В. ЕЛИСЕЕВА
М. А. ПЕСКОВ**

Омский государственный
технический университет

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПРОТЯГИВАНИЯ ПАЗОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Проведен анализ состояния проблемы протягивания лопаток компрессоров в России и за рубежом. Рассмотрены нагрузки, которые испытывает режущая пластина при работе. Произведен подбор режущих пластин из каталога твердосплавных изделий Кировоградского завода твердых сплавов для обработки титана и жаропрочных сталей с учетом действующих сил.

Ключевые слова: протягивание, нагрузка, лопатка, режущая пластина, титан, жаропрочный сплав.

В современных условиях острой конкурентной борьбы за рынки сбыта авиационной техники как внутри страны, так и за рубежом интенсификация производства газотурбинных двигателей (ГТД) означает внедрение мероприятий по значительному сокращению трудозатрат, снижению себестоимости обработки, сокращению сроков освоения новых изделий при одновременном повышении качества и

стабильности обработки, надежности и ресурса работы деталей в условиях эксплуатации. Повышенные эксплуатационные требования к деталям ГТД обусловлены особыми требованиями к безопасности воздушных перевозок людей и грузов.

Главной проблемой в современном протягивании является обеспечение качества и устойчивой износостойкости при минимальных затратах

на производство лопаток компрессора. В частности, для снижения затрат основными решениями являются снижение трудоемкости и удешевление инструментального хозяйства в области протягивания. Снижение трудоемкости достигается увеличением скорости резания.

В данный момент в нашей и зарубежной промышленности в основном используются протяжки из быстрорежущей стали, например, P18. Для увеличения стойкости инструмента рекомендуется использовать протяжки с напайными твердосплавными пластинами, также сборные протяжки со специальными режущими элементами [1, 2]. Во втором варианте для обработки титана используются пластины ВК8. В то же время современный уровень сменных твердосплавных пластин позволяет более гибко подбирать режимы резания, увеличивать скорость резания при обработке лопаток компрессора из титана и жаропрочных сталей. Сборные протяжки со специальными режущими элементами также позволяют решить эти проблемы, но это ведет к удорожанию инструментального хозяйства, увеличению номенклатуры режущих и крепежных элементов. Также ввиду отсутствия развитой конкуренции и специфичности инструмента могут возникать проблемы с поставками.

Одним из путей повышения эффективности финишной механической обработки деталей ГТД является разработка, исследование и внедрение такого высокопроизводительного процесса, как скоростное протягивание сборными протяжками со сменными твердосплавными пластинами. Применение режущего инструмента с твердосплавными пластинами позволяет уйти от проблемы неравномерной заточки зубьев, что требует высокой квалификации заточника и высокоточного дорогого оборудования. Однако для получения точных геометрических параметров протяжки требуется очень точная обработка посадочных мест под пластины. В то же время затраты на изготовление корпуса протяжки окупаются из-за ее многократного использования.

Геометрические параметры режущего инструмента оказывают существенное влияние на усилие резания, качество поверхности и износ инструмента [3]. Так, с увеличением угла γ инструмент легче врезается в материал, снижаются силы резания, улучшается качество поверхности, но повышается износ инструмента. Наличие угла снижает трение инструмента о поверхность резания, уменьшая его износ, но чрезмерное его увеличение ослабляет режущую кромку, способствуя ее разрушению при ударных нагрузках.

Силы резания P представляют собой силы, действующие на режущий инструмент в процессе упругопластической деформации и разрушения срезаемой стружки.

Силы резания приводят к вершине лезвия или к точке режущей кромки и раскладывают по координатным осям прямоугольной системы координат хуз. В этой системе координат ось z направлена по скорости главного движения и ее положительное направление соответствует направлению действия обрабатываемого материала на инструмент. Ось y направлена по радиусу окружности главного движения вершины. Ее положительное направление также соответствует направлению действия металла на инструмент. Направление оси x выбирается из условия образования правой системы координат. Значение усилия резания определяется несколькими факторами. Оно растет с увеличением глубины

резания h и скорости подачи s (сечения срезаемой стружки), скорости резания v , со снижением переднего угла γ режущего инструмента. Расчет усилия резания производится по эмпирическим формулам, установленным для каждого способа обработки (см. справочники по обработке резанием) [4–6]. Например, для строгания эта формула имеет вид

$$P = C_p h X_p s Y_p X_n,$$

где коэффициенты C_p , X_p , Y_p , n характеризуют материал заготовки, реза и вид обработки.

Мощность процесса резания определяется скалярным произведением

$$N = P \cdot v_e,$$

где v_e — полная скорость перемещения.

Выразив это произведение через проекции по координатным осям, получим:

$$N = P_z v_z + P_y v_y + P_x v_x,$$

где v_x , v_y , v_z — проекции на оси координат скорости движения точки приложения равнодействующей сил резания. В практических расчетах используется приближенная зависимость $N = P_z v$. Это упрощение обусловлено тем, что составляющие P_y и P_x полной силы резания малы по сравнению с P_z , а скорость подачи относительно скорости резания составляет всего 1–0,1 %.

На рис. 1 рассмотрена схема распределения нагрузки на кромку режущей пластины.

В данном случае сила действует в оси x , z .

С учетом моделирования и испытания сборных резцов выбираем пластины для титана ВТЗ-1, ВТ8 и для жаропрочных сталей ЭИ 787 ВД и ВЖЛ 14. Для точения жаропрочных сталей типа ЭИ 787 ВД и ВЖЛ 14 можно использовать квадратные пластины для полустачковой обработки, а так же возможно использование пластин оптимизированных

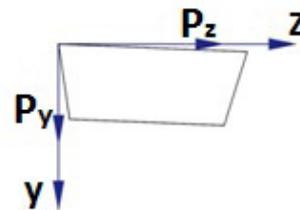


Рис. 1. Распределение нагрузки на кромку режущей пластины при протягивании

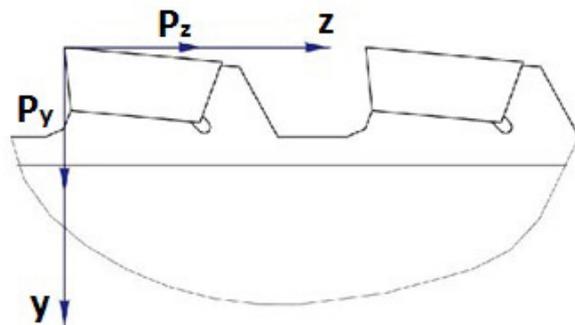


Рис. 2. Узел крепления выбранных пластин для титана и сталей с учетом действующих сил

сверху, методом косой тяги, клиновое крепление, напайное крепление, крепление силами упругой деформации и др.

На рис. 2 рассмотрены нагрузки, действующие на режущие кромки в процессе протягивания.

В данном примере нагрузки компенсируются жесткими поверхностями корпуса протяжки, нагрузки на регулируемые или подвижные опоры отсутствуют. Крепление производится винтом сверху с утопающей головкой, что не препятствует движению протяжки и сходу стружки.

Библиографический список

1. Палей, М. М. Технология производства металлорежущих инструментов / М. М. Палей. — М. : Машиностроение, 1982. — 256 с.
2. Бугай, И. А. Повышение точности и эффективности обработки деталей из труднообрабатываемых материалов высокоточными сборными протяжками с твердосплавной режущей частью / И. А. Бугай, Е. В. Васильев, М. В. Васильева // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 3 (143). — С. 114–116.
3. Васильев, Е. В. Повышение точности шлифования круглых протяжек на станках с ЧПУ за счет изменения схемы базирования / Е. В. Васильев, И. А. Бугай, П. В. Назаров, А. Ю. Попов // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники : Материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. — Омск, 2013. — С. 134–138.

4. Справочник по обработке металлов резанием / Ф. Н. Абрамов [и др.]. — Киев : Техника, 1983. — 239 с.

5. Режимы резания труднообрабатываемых материалов / Я. Л. Гуревич [и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1986. — 240 с.

6. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. — М. : Машиностроение, 1976. — 278 с.

7. Киффер, Р. Твердые сплавы / Р. Киффер, Ф. Бенезовский ; перевод с нем. — М. : Металлургия, 1971. — 392 с.

БУГАЙ Иван Анатольевич, аспирант, ассистент кафедры металлорежущих станков и инструментов.

ВАСИЛЬЕВ Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов.

ВАСИЛЬЕВА Мария Владимировна, магистрант гр. КТОМ-151 факультета элитного образования и магистратуры.

ЕЛИСЕЕВА Александра Владимировна, студентка гр. КТО-131 машиностроительного института.

ПЕСКОВ Максим Александрович, студент гр. КТО-133 машиностроительного института.

Адрес для переписки: boogie9@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2015 г.

© И. А. Бугай, Е. В. Васильев, М. В. Васильева, А. В. Елисеева, М. А. Песков

УДК 621.924

**П. В. НАЗАРОВ
Е. В. ВАСИЛЬЕВ
И. К. ЧЕРНЫХ
М. В. ВАСИЛЬЕВА
А. С. АДАНИЦКАЯ**

Омский государственный
технический университет

СПЕЦИАЛЬНОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЕ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

В статье проводится анализ существующих приспособлений, предназначенных для шлифования изделий различной формы, анализируются их конструкция, их преимущества и недостатки и разрабатывается приспособление для шлифования задней поверхности цилиндрических пластин.

Ключевые слова: наружное шлифование, цилиндрические пластины, приспособление для шлифования.

На машиностроительных предприятиях шлифованием обрабатываются цилиндрические пластины с помощью различных приспособлений, при использовании которых увеличивается время наладки и смены деталей. Это связано с тем, что использу-

емые приспособления не обладают универсальностью.

Существуют различные приспособления, предназначенные для наружного шлифования деталей, анализ которых (табл. 1) [1, 2] показал главные

Анализ существующих приспособлений для шлифования

Приспособление для шлифования радиусных поверхностей (Патент RU №147616) [1]	
Достоинства: 1. Возможность быстрой замены обрабатываемых изделий после шлифования. 2. Возможность шлифования радиусных поверхностей.	Недостатки: 1. Невозможность закрепления деталей вращения. 2. Прижим деталей болтами.
Приспособление для шлифования торца изделия (Патент RU №62553) [2]	
Достоинства: 1. Возможность быстрой замены обрабатываемых изделий после шлифования. 2. Возможность шлифования торца изделий.	Недостатки: 1. Невозможность закрепления деталей вращения.
Приспособление для наружного шлифования задней поверхности цилиндрических пластин	
Достоинства: 1. Возможность быстрой замены обрабатываемых изделий после шлифования. 2. Возможность шлифования цилиндрических, конических поверхностей.	Недостатки: 1. Возможность установки только тел вращения.

недостатки: невозможность закрепления и обработки цилиндрических поверхностей и сравнительно высокое время наладки и смены деталей.

При наружном шлифовании различных поверхностей деталей используются шлифовально-заточные станки [3], при обработке на которых для сокращения штучного времени используются специальные приспособления [4] для шлифования. Устройство данных приспособлений предполагает собой установку обрабатываемой детали на подвижный или неподвижный блок, закрепление её на приспособлении прижимами или специальными зажимными устройствами.

Для осуществления процесса шлифования необходимы следующие движения формообразования: вращение шлифовального круга (n , об/мин), движение подачи — поперечной ($S_{\text{поп}}$, мм/мин) и продольной ($S_{\text{пр}}$, мм/мин), а также вращение обрабатываемой детали.

Преимущество использования данных приспособлений заключается в том, что они значительно сокращают время обработки деталей и наладку станка, особенно в массовом и серийном производстве. Как правило, приспособления предназначены для обработки поверхностей конкретного типа, например, радиусных или торцевых поверхностей деталей. Поэтому важной задачей является разработка приспособления, которое обеспечит возможность наружного шлифования задней поверхности цилиндрических пластин на шлифовально-заточных станках.

Для обеспечения шлифования наружных цилиндрических или конических поверхностей необходимо разработать специальное приспособление, которое, при этом, будет обладать такими преимуществами, как быстрая замена обрабатываемого изделия после шлифования, жёсткое закрепление детали в приспособлении.

Обрабатываемая деталь устанавливается в центрах приспособления и прижимается центрирующим устройством, при этом конструкция приспособления позволяет обрабатывать детали различных длин и диаметров.

Приспособление для наружного шлифования задней поверхности цилиндрических пластин (рис. 1), имеющее в своем составе оправку 1, на которой зафиксирована кулиса 2 с подвижным блоком 3, где устанавливается обрабатываемая деталь 4, кулиса выполнена с прямоугольным глухим пазом длиной l_1 , глубиной t_1 и шириной b_1 , расположенным на противоположной от рабочей зоны приспособления стороне и предназначенным для установки подвижного блока на требуемую высоту соответственно длине обрабатываемой детали, на подвижном блоке жёстко зафиксирован центр 5 для фиксации обрабатываемой детали 4, выполненный из того же материала, что и подвижный блок (рис. 2), расположенный на расстоянии максимального допустимого радиуса обрабатываемой детали от стороны кулисы, обращенной к рабочей зоне приспособления, на кулисе жёстко зафиксирована направляющая 6, выполненная из того же материала, что и кулиса, с отверстием, расположенным на оси центра, в котором установлено центрирующее устройство (рис. 3), включающее в себя прижимной центр 7, пружину 8, предназначенную для прижатия детали, втулку 9, служащую в данной конструкции подшипником скольжения, кольцо 10, служащее для упора в него пружины и ручку 11 для поднятия прижимного центра.

Кулиса 2 представляет собой прямоугольный корпус длиной l_3 , высотой a_3 и шириной b_3 и выполнена с глухим пазом A_1 длиной l_1 , глубиной t_1 и шириной b_1 и сквозным отверстием диаметром d_1 , предназначенным для крепления кулисы 2 на оправке 1. Паз A_1 расположен на расстоянии a_1 от оси оправки на противоположной от рабочей зоны приспособления стороне кулисы 2 и предназначен для фиксации болтом на кулисе 2 подвижного блока 3. Подвижный блок 3 представляет собой прямоугольный корпус длиной l_2 , высотой a_2 и шириной b_2 , в котором выполнено резьбовое отверстие для закручивания в него болта, причём так, чтобы болт упирался в дно паза A_1 и сквозное отверстие, соответствующее по размерам сторонам поперечного сечения кулисы 2, оси этих отвер-

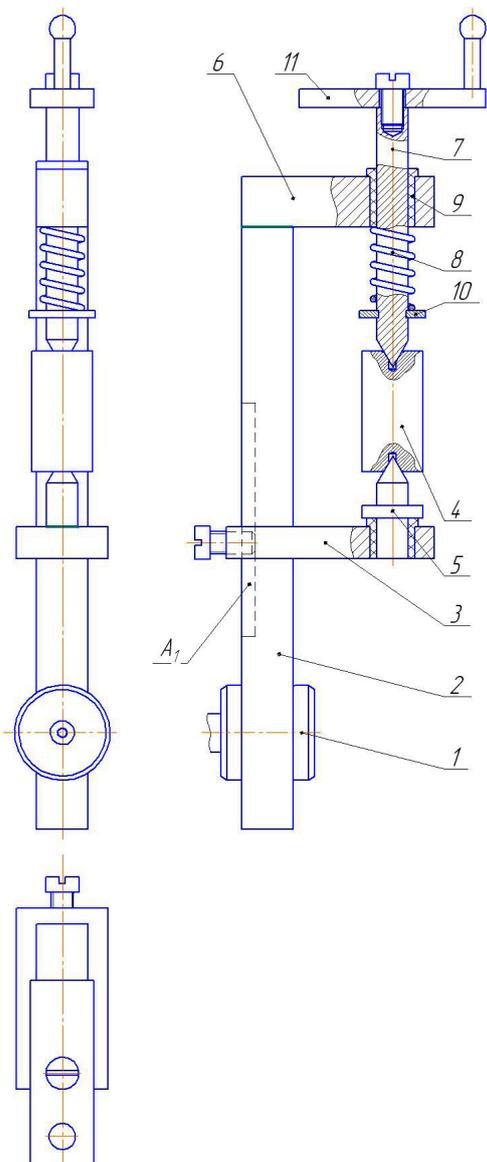


Рис. 1. Общий вид приспособления

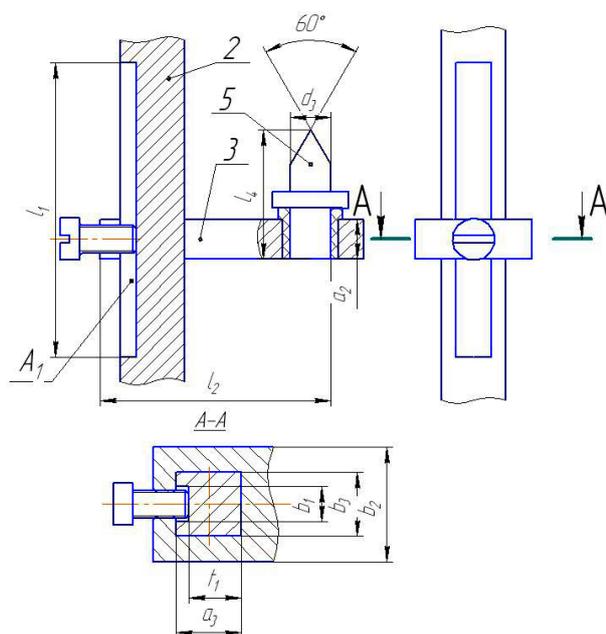


Рис. 2. Подвижный центр на кулисе

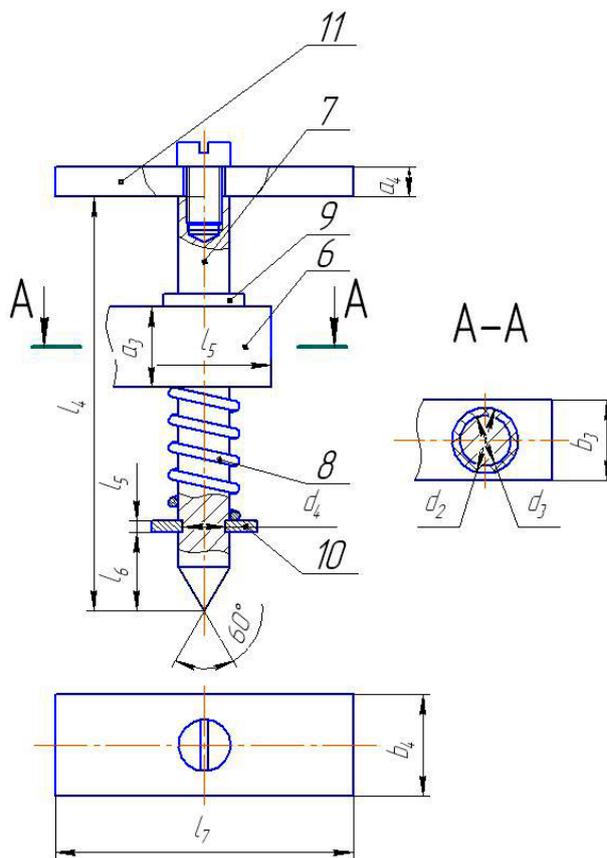


Рис. 3. Центрирующее устройство

стей перпендикулярны друг другу и располагаются в вертикальной плоскости. На подвижном блоке 3 жестко зафиксирован центр 5 на оси обрабатываемой детали 4, которая расположена на расстоянии максимально допустимого радиуса обрабатываемой детали от той стороны кулисы, которая обращена к рабочей зоне приспособления, предназначенный для фиксации на нём обрабатываемой детали 4. Центр 5 представляет собой цилиндрический вал диаметром d_5 и длиной l_5 , выполненный из того же материала, что и подвижный блок 3, на котором с одной из сторон выполнено заострение на угол 60° , (т.к. обрабатываемые детали, как правило, имеют унифицированные центровые отверстия под углом 60°), служащее для упора в центровое отверстие обрабатываемой детали 6, а с другой стороны жестко закрепленный на подвижном блоке 3. На торце кулисы 2 жестко зафиксирована направляющая 6 представляющая собой прямоугольный корпус длиной l_3 , высотой a_3 и шириной b_3 , причём так, что направляющая 6 и кулиса 2 образуют между собой прямой угол и торец направляющей 6 располагается в одной плоскости с той стороной кулисы 2 которая противоположна рабочей зоне приспособления. В направляющей 6 выполнено сквозное отверстие диаметром d_3 , ось которого совпадает с осью обрабатываемой детали. Отверстие направляющей 6 предназначено для установки в нём центрирующего устройства, которое состоит из прижимного центра 7, пружины 8, втулки 9, кольца 10 и ручки 11. Втулка 9 представляет собой цилиндрический вал диаметром d_2 и длиной l_3 , выполненный с буртиком, во втулке выполнено сквозное отверстие диаметром d_3 для установки в нём прижимного центра 7. Прижимной центр 7 представляет собой вал диаметром

d_3 и длиной l_4 . С одной стороны прижимного центра 7 выполнено резьбовое отверстие, предназначенное для крепления ручки 11 к прижимному центру 7 болтом. С другой стороны прижимного центра 7 выполнено заострение на угол 60° , служащее для упора в центровое отверстие обрабатываемой детали 4. На прижимном центре 7 также выполнена канавка диаметром d_4 и длиной l_5 , расположенная на расстоянии l_6 от заостренной стороны, в которую установлено кольцо 10, предназначенное для прижима центра к детали пружиной 8, предварительно установленной на прижимном центре 7 между направляющей 6 и кольцом 10 к обрабатываемой детали 4. Ручка 11 представляет собой прямоугольный корпус длиной l_7 , высотой a_4 и шириной b_4 , в середине которого выполнено резьбовое отверстие для крепления её болтом к прижимному центру 7.

Библиографический список

1. Пат. 147616 РФ, МПК В24В27/00. Приспособление для наружного шлифования / Васильев Е. В., Попов А. Ю., Назаров П. В., Бугай И. А., Сергеев В. А.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет». — № 2014115370/02; заявл. 16.04.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31. — 2 с.
2. Пат. 62553 РФ, МПК В24В27/04. Приспособление для наружного шлифования изделия / Васильев Е. В., Попов А. Ю., Балмасова Е. А.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет». — № 2006130631/22; заявл. 24.08.2006; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 12. — 2 с.

3. Назаров, П. В. Модернизация специального станка, предназначенного для шлифования передней поверхности и стружечной канавки протяжки / П. В. Назаров, Е. В. Васильев, В. А. Сергеев, М. В. Васильева / Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 3 (143). — С. 175–176.
4. Назаров, П. В. Разработка конструкции специального приспособления для фасонной правки шлифовального круга / П. В. Назаров, Е. В. Васильев, А. Ю. Попов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 2 (140). — С. 114–117.

НАЗАРОВ Павел Владиславович, ассистент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

ВАСИЛЬЕВ Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

ЧЕРНЫХ Иван Константинович, студент гр. КТО-133 машиностроительного института.

ВАСИЛЬЕВА Мария Владимировна, магистрант гр. КТОМ-151 факультета элитного образования и магистратуры.

АДАНИЦКАЯ Анастасия Сергеевна, студентка гр. КТО-121 машиностроительного института. Адрес для переписки: nazaroffpavel@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2015 г.

© П. В. Назаров, Е. В. Васильев, И. К. Черных, М. В. Васильева, А. С. Аданицкая

УДК 62-182.38

Д. А. Скрипниченко

Омский автобронетанковый инженерный институт

ПРЕДЕЛЬНЫЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ГУСЕНИЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

Сформулированы и решены несколько прикладных задач по определению предельных режимов движения многоцелевых гусеничных платформ в условиях полевых дорог и бездорожья; результаты следует учитывать при разработке наставлений и инструкций по безопасной и надежной эксплуатации этих машин.

Ключевые слова: многоцелевая гусеничная платформа, предельные режимы движения, пробой подвески.

Одним из требований, предъявляемых к современным гусеничным платформам, является повышение их мобильности за счет быстрого перемещения по дорогам, естественным трассам и пересеченной местности. Совершенствование ходовой части на стадии её проектирования связано с составлением математических моделей, описывающих динамические процессы, протекающие в конструкции

и механизмах подвески, с установлением связей динамических явлений и условий движения.

В настоящее время повышение скорости движения платформ по дорогам и пересеченной местности привело к созданию новых сложных систем подвесок гусеничных машин военного назначения, на базе шасси этих гусеничных машин для нужд народного хозяйства создан целый класс многоцеле-

вых гусеничных платформ различного назначения: траншейный роторный комплекс, бульдозер, мостовкладчик, эвакуатор, кран, топливозаправщик, вездеход и др. Машины различаются массогабаритными и инерционными характеристиками. Это определяет их мобильность при прямом и косвенном применении. Соответственно, эксплуатация таких машин в условиях бездорожья или передвижения по полевым дорогам [1] во многом будет определяться возможностями подвески.

Динамические процессы, вызываемые внешними силами вплоть до ударного соприкосновения балансира катка с упором (пробой подвески), определяют нагруженность деталей и связей, механизмов платформы, навесного оборудования и оказывают решающее влияние на ресурс платформы, плавность её хода, воздействие на персонал, его здоровье и работоспособность. Режим движения с пробоем подвески является предельным и в условиях нормальной эксплуатации гусеничной платформы недопустим.

Ясно, что пробой подвески наступает после того, когда ее способность к поглощению энергии колебаний выбирается полностью, что, с одной стороны, определяется предельным уровнем потенциальной энергии, воспринимаемой подвеской, а с другой — уровнем кинетической энергии подрессоренной массы, определяемой и зависимой как от величины массы, так и от параметров геометрии дорожного полотна и скорости движения платформы.

Для определения предельных режимов движения гусеничной платформы поставим и решим несколько прикладных задач динамики движения гусеничной платформы по регулярному профилю, имея в виду движение ее центра масс, т.к. влияние распределения подрессоренной массы, характерной для машины конкретного исполнения, способного вызывать пробой узлов подвески, представляет собой отдельную задачу.

При моделировании движения платформы с целью определения предельной скорости её движения вполне достаточно рассмотреть плоское движение, причем в первом приближении из трех обобщенных координат по критерию энергоёмкости подвески наибольший интерес представляет линейная координата вертикального перемещения центра масс объекта, поскольку продольное движение в курсовой плоскости принимается с постоянной скоростью, а продольно-угловое дополнительно требует учета распределения масс объекта и, как было отмечено, для конкретной машины распределение масс может иметь существенные различия, как и свойства подвески в этом движении. Выделив только линейную координату перемещения центра масс объекта по вертикали, можно сложную упругую подвеску реальной машины заменить единым упругим безмассовым элементом, передающим кинематическое возбуждение на подрессоренную массу платформы.

Если обозначить подрессоренную массу « m », жесткость подвески « c », y — координату отклонения регулярного профиля от базовой горизонтали, y_s — координату центра масс объекта, то, принимая $y_0 = y_0 \cos \omega t$, где y_0 — амплитудное отклонение профиля от базовой горизонтали; ω — круговая частота кинематического возбуждения; t — время, запишем дифференциальное уравнение движения центра масс платформы

$$-c(y_s - y) = m \ddot{y}_s + c y = c y_s. \quad (1)$$

Из формулы фактически следует, что динамический ход подвески ($y_s - y$) определяется отношением максимальной силы инерции объекта от кинематического возбуждения к жесткости подвески. Динамический ход, жесткость подвески и подрессоренная масса известны, тем самым из (1) определимо предельное значение вертикальной составляющей линейного ускорения центра масс.

Уравнение (1) без демпферного движения преобразуется к виду:

$$\ddot{y}_s + k^2 y_s = -k^2 \cos \omega t, \quad (2)$$

где $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$, и уравнение (2) имеет решение:

$$y_s = a \cos \omega t, \quad (3)$$

$$a = \frac{h}{k^2 - \omega^2},$$

где $h = y_0 \omega_0^2$.

Скорость $V_s^{(b)}$ вертикального перемещения центра масс платформ может быть получена дифференцированием (3), т.е.

$$V_s^{(e)} = \frac{dy_s}{dt} = -a \omega \sin \omega t. \quad (4)$$

1. Предельное значение $V_s^{(b)}$ можно определить из уравнения энергетического баланса кинетической энергии в исследуемом движении и предельным уровнем потенциальной энергии, воспринимаемой подвеской, т.е.:

$$\frac{m [V_s^{(e)}]^2}{2} = \frac{c \delta^2}{2}, \quad \text{откуда} \quad V_s^{(e)} = \sqrt{\frac{c \delta^2}{m}} \quad (5)$$

где δ — динамический ход подвески.

Приняв, например, $m = 38000$ кг, $c = 2510$ Н/мм, $\delta = 450$ мм, получим $V_s^{(b)} = 3,65$ м/с, которую следует считать предельной.

Подставив значение $V_s^{(b)}$ в (4) и приняв $\sin \omega t = 0$, получим

$$\omega = \frac{V_s^{(e)}}{a}. \quad (6)$$

Зависимость (6) позволяет связать параметры дорожного полотна: y_0 , время одного периода колебаний $\tau = 2\pi/\omega$, длину волны $\lambda = V \tau$ со скоростью V (км/ч) движения машины. Используя прежние исходные данные и предельное значение $V_s^{(b)}$, проведем необходимые расчеты и сведем в табл. 1 предельную продольную скорость V (км/ч) движения платформы в зависимости от параметров дорожного полотна y_0 (м) и λ (м) по критерию энергоёмкости подвески.

В табл. 1* — отмечены значения, при которых еще может быть реализован полный период колебаний центра масс гусеничной платформы. Как известно, при интенсивном движении машин исследуемого класса по регулярным естественным трассам на дорожном полотне образуется периодический профиль с длиной волны $\lambda = (6 \div 12)$ м. Поскольку длина опорной части гусеничной платформы $l \approx 4$ м, то пороговыми значениями можно считать $\lambda \geq 4$ м, это и обозначено (*).

Из массива предельных значений параметров профилей и скорости движения следует, что с увеличением y_0 , предельная скорость движения гусеничной платформы уменьшается. Так, при $y_0 = 0,5$ м и $\lambda \approx 7$ м значение предельной скорости движения гусеничной платформы по пробую подвески

Предельные значения скорости движения машины V (км/час)
в зависимости от параметров y_0 (м) и λ (м)

$y_0 = 0,5$ м	V	70	60	50	40	30	20*	10
	λ	16,8	13,9	11,5	9,32	6,99	4,66	1,7
$y_0 = 0,4$ м	V	70	60	50	40	30*	20	
	λ	12,9	11,1	9,24	7,4	5,58	3,7	
$y_0 = 0,3$ м	V	70	60	50	40*	30		
	λ	9,8	8,4	7,03	5,66	4,2		
$y_0 = 0,2$ м	V	70	60	50*				
	λ	6,59	5,66	4,6				
$y_0 = 0,1$ м	V	70	60					
	λ	3,33	2,82					

составляет всего 30 км/час, даже при относительно малых значениях $y_0 = 0,3$ м скорость движения машин имеет пороговое значение $V = 40$ км/час.

Аналогичный результат можно получить иным путем, выразив круговую частоту ω (1/с) через линейную частоту f периодичности профиля $f = \omega/2\pi$, откуда длина λ волны профиля дорожного полотна и скорость движения гусеничной платформы связаны зависимостью вида $V = \lambda f$.

2. Представляет интерес прикладная задача об определении связи скорости движения гусеничной платформы и параметров регулярного профиля дорожного полотна, с одной стороны, и с частотой собственных вертикальных колебаний поддрессированной части гусеничной платформы — с другой.

Это особенно важно для выбора режима движения по критерию непопадания в резонансную зону, ибо близкие по значению собственные и вынужденные частоты способны вызвать движение гусеничной платформы со значительными амплитудами, приводящими к ее отрыву от дорожного полотна с последующим падением, сопровождающимся пробоем подвески.

Поскольку собственная круговая частота линейных колебаний гусеничной платформы по вертикали будет такой:

$$k = \sqrt{\frac{C}{m}}, \quad (7)$$

то с учетом принятой для расчета массовой характеристики и жесткости подвески, значение ω составит $\omega = 8,1$ с⁻¹ или

$$f = \frac{k}{2\pi} = 1,3 \text{ Гц}, \quad (8)$$

т.е. период одного полного собственного вертикального колебания гусеничной платформы будет равен $\tau = 1/f \approx 0,77$ с.

Определим длину волны регулярного профиля дорожного полотна, способного вызвать кинематическое возбуждение с этой частотой в зависимости от скорости движения гусеничной платформы.

Так, при скорости $V = 60$ км/час за 1 сек машина проходит путь, равный 16,4 м, а за 0,77 с этот путь составляет 12,62 м, что и будет длиной волны, способной вызвать резонансное состояние системы. При скорости $V = 50$ км/час $\rightarrow \lambda = 10,78$ м;

при $V = 40$ км/час $\rightarrow \lambda = 8,47$ м; при $V = 30$ км/час $\rightarrow \lambda = 6,66$ м.

Именно этим обстоятельством (наложением собственных колебаний) объясняется эффект возникновения периодического профиля на естественных трассах при интенсивном движении по ним машин исследуемого класса.

При длине волны $\lambda < l$ проход центра масс в режиме полного колебания нереализуем, поэтому при $\lambda < l$ подвеска будет не способна целно копировать профиль дорожного полотна и периодическое движение центра масс заменится иным режимом, с угловыми колебаниями корпуса, и в настоящей работе не рассматривается.

3. Представляет особый интерес еще одна задача определения связи параметров регулярного профиля дорожного полотна и скорости движения гусеничной платформы, при сочетаниях которых возникают предельно допустимые уровни вертикальных ускорений. Для экипажа этот уровень ограничен величиной 3g [2, 3].

Поскольку

$$\frac{d^2 y_s}{dt^2} = -a\omega^2 \cos\omega t, \quad (9)$$

то линейное ускорение по вертикали линейно зависит от амплитуды «а» и во второй степени от частоты от кинематического возбуждения. Положив в (9) $\cos \omega t = 1$, получим

$$30 \text{ м/с}^2 = -a \omega^2. \quad (10)$$

Проведем необходимые расчеты, разместив в табл. 2 предельные значения скорости движения гусеничной платформы V (км/час) в зависимости от параметров y_0 (м) и λ (м).

Анализ массива свидетельствует о совпадающих ограничениях скорости движения гусеничной платформы по предельному значению вертикальности ускорений и по предельному значению вертикальной скорости перемещения ее центра масс, полученному выше.

4. Используя критерий энергоёмкости подвески и максимальное значение вертикальной скорости $V_s^{(B)}$ центра масс, определим предельную высоту уступа (трамплина) искусственного или естественного происхождения, с которого платформа,

Предельные значения скорости движения машины V (км/час)
в зависимости от параметров y_0 (м) и λ (м)

$y_0 = 0,5$ м	V	70	60	50	40	30*	20	10
	λ	15,71	13,4	11,1	7,29	6,74	4,49	1,7
$y_0 = 0,4$ м	V	70	60	50	40	30*	20	10
	λ	13,9	11,9	9,9	7,9	5,99	3,9	1,51
$y_0 = 0,3$ м	V	70	60	50	40*	30	20	10
	λ	12,8	10,2	8,55	6,88	5,16	3,44	1,3
$y_0 = 0,2$ м	V	70	60	50	40*	30	20	10
	λ	9,89	8,48	7,0	5,66	4,24	2,83	1,07
$y_0 = 0,1$ м	V	70	60	50*	40	30	20	10
	λ	6,98	5,97	4,96	3,99	2,99	1,99	0,75

проходя фазу свободного полета, падает на горизонтальную поверхность по условию пробоя подвески:

$$V_s^{(B)} = V_0 + gt, \quad (11)$$

где g — ускорение свободного падения $g = 9,8$ м/с².
При $V_0 = 0$, получим:

$$t = \frac{V_s^{(B)}}{g}.$$

Последнее с учетом $V_s^{(B)} = 3,65$ м/с определит значение $t = 0,373$ с.

Предельная высота H уступа, падение с которого вызовет пробой подвески, будет такой

$$H = \frac{gt^2}{2}.$$

После подстановки значений получим $H = 0,67$ м. Реально, с учетом трения в шарнирах балансиров, потерь в гидроамортизаторах, в контактах опорных катков с гусеницей, а гусеницы с грунтом, демпфирующих свойств самой гусеницы предельная высота H будет несколько выше.

Представленный комплекс из решений прикладных задач по определению предельных режимов движения многоцелевых гусеничных машин вполне распространим на гусеничные платформы любых типоразмеров, массовых характеристик и параме-

тров подвески. Решения таких задач необходимы как создателям подобной техники, так и службам и ведомствам, у которых такая техника находится в эксплуатации. Результаты математического моделирования рекомендуются для разработки наставлений по практическому вождению машин, создаваемых на базе мобильных быстроходных гусеничных платформ.

Библиографический список

- Исаков, П. П. Теория и конструкция танка. В 10 т. Т. 6. Параметры внешней среды, используемые в расчетах танков / П. П. Исаков. — М. : Машиностроение, 1985. — 196 с.
- Дмитриев, А. А. Теория и расчет нелинейных систем поддресоривания гусеничных машин : учеб. / А. А. Дмитриев, В. А. Чобиток, А. В. Тельминов // М. : Машиностроение, 1976. — 207 с.
- Кобринский, А. Е. Виброударные системы / А. Е. Кобринский, А. А. Кобринский. — М. : Наука, 1973. — 592 с.

СКРИПНИЧЕНКО Дмитрий Александрович, преподаватель кафедры электрооборудования и автоматки.

Адрес для переписки: tankist0085@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 23.12.2015 г.

© Д. А. Скрипниченко

Книжная полка

621.56/М17

Максименко, В. А. Установки и системы холодильной техники [Электронный ресурс] : конспект лекций / В. А. Максименко. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Отражены основные определения и терминология холодильной техники, базовые понятия, касающиеся различных типов холодильных установок и вспомогательного оборудования. Конспект лекций предназначен для помощи студентам очной, заочной и дистанционной формы обучения в усвоении теоретического материала по дисциплине «Установки и системы холодильной техники». Данный конспект охватывает основные вопросы, предусмотренные рабочей программой дисциплины.