

УДК 621.744:666.798.2

А. А. Лещук, Т. А. Цысарь, В. В. Ивженко (г. Киев)

Компьютерное моделирование процессов теплопереноса при инъекционном литье изделий сложных форм

Представлены результаты компьютерного моделирования процесса теплопереноса при инъекционном литье. Получено распределение температуры в рабочем тракте установки и пресс-формах для литья керамических изделий в форме сопел, шаров сплошных, шаров с отверстием и колец. Рассчитаны исходные технологические зависимости времени остывания термопластической массы на основе AlN, SiC и WC до температуры 40 °C для изделий различных форм и типоразмеров.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, процессы теплопереноса, инъекционное литье, керамические изделия.

В настоящее время в мировой практике исследования процессов инъекционного формования наиболее широко используют коммерческие компьютерные программы C-Mold, Moldflow, ProCAST [1]. В данной работе использовали разработанный авторами ранее пакет программ для расчета термомеханического состояния аппаратуры для получения и обработки материалов в условиях сложного термобарического нагружения [2].

Одной из основных задач при разработке технологии массового производства изделий методом инъекционного формования является расчет процессов теплопереноса на стадии литья. Это позволяет определять поле температуры в рабочем тракте и температурно-временные зависимости остывания инжектированного материала для разных типов и размеров пресс-форм и различных материалов, инжектированных в них.

Ранее авторами было проведено компьютерное моделирование процессов теплопереноса на стадии инъекционного литья для разработанной установки [3, 4]. Были определены условия нагрева рабочего цилиндра, обеспечивающие однородное распределение температуры в рабочем тракте, заполненном термопластической массой инжектируемого материала. При этом расчет процесса охлаждения пресс-формы после инжектирования проводили по условной схеме, не предусматривающей все технологические этапы стадии инъекционного литья.

В настоящей работе было проведено поэтапное компьютерное моделирование процесса теплопереноса при инъекционном литье с целью получения оптимальных значений технологических параметров формования в зависимости от материала, формы и типоразмера керамического изделия.

Постановка задачи. Нагрев термопластической массы в рабочем тракте установки инъекционного литья осуществляется подводом тепла от нагревателя, расположенного вдоль рабочего цилиндра, в котором циркулирует жидкость, нагреваемая до определенной температуры. На первом этапе моделирования процессов теплопереноса в установке (до подсоединения пресс-

формы) необходимо подобрать температуру жидкости в нагревателе, которая обеспечивала бы однородный прогрев термопластичной массы до температуры ~ 80 °С. После расчета стационарного прогрева термопластичной массы в рабочем тракте можно проводить моделирование нестационарных тепловых процессов на этапах подсоединения пресс-формы, после инжектирования в нее термопластичной массы и во время свободного остывания пресс-формы вне установки.

Распределение температуры определяли из численного решения задачи теплопроводности для всей установки инжекционного литья, используя методику, изложенную в [3, 4]. При этом дополнительно были разработаны алгоритм и программа для возможности поэтапного моделирования процессов теплопереноса на одной конечноэлементной сетке для каждого типа пресс-формы.

Схема установки инжекционного литья приведена на рис. 1. Расчет теплового состояния установки разделили на четыре этапа, соответствующие реальному технологическому процессу:

этап 1 — стационарное состояние после нагрева термопластичной массы в рабочем тракте до подсоединения пресс-формы (в области *DEFGHI* предполагали наличие воздуха);

этап 2 — нестационарный теплоперенос во всей установке в течение 15 с после подсоединения пресс-формы;

этап 3 — нестационарный теплоперенос во всей установке в течение 20 с после инжектирования термопластичной массы в пресс-форму;

этап 4 — нестационарное состояние при охлаждении пресс-формы вне установки (в областях *ABCDI* и *EFGH* предполагали наличие воздуха).

Расчет проводили для процессов инжекционного литья изделий в форме сопла, шара с осевым цилиндрическим отверстием, кольца и сплошного шара, причем для каждого изделия рассматривали три типоразмера (малый, средний, большой) и три материала (на основе AlN, WC и SiC). Ввиду осевой симметрии установки и граничных условий на ее поверхности расчетная схема включала половину осевого сечения (см. рис. 1). Таким образом, для моделирования процессов теплопереноса при инжекционном литье была проведена конечноэлементная дискретизация 12 схем установки, которые отличались типом пресс-формы и ее размерами.

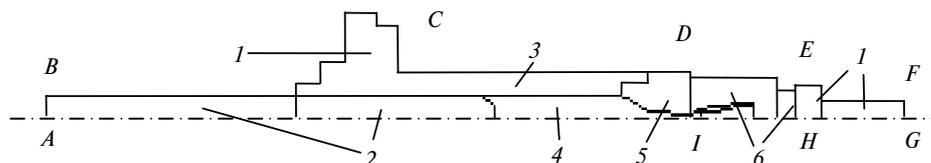


Рис. 1. Расчетная схема установки инжекционного литья: 1 — стальные конструктивные элементы; 2 — стальной поршень со штоком гидроцилиндра; 3 — стальной цилиндр; 4 — рабочий тракт с термопластичной массой; 5 — стальное сопло; 6 — пресс-форма для формирования изделий в виде сопла.

Рассмотрим граничные и начальные условия задачи теплопроводности для каждого из этапов расчета.

Этап 1. На поверхностях *AB* и *FG*, достаточно удаленных от рабочей зоны, задавали температуру 20 °С; на внешней поверхности цилиндра *CD* — условие конвективного теплообмена с водой (коэффициент теплоотдачи $\alpha = 7600$ Вт/(м²·°С), температура внешней среды $\Theta = 80$ °С); на остальной части

граничной поверхности — условие конвективного теплообмена с воздухом ($\alpha = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, $\Theta = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ на поверхности BC и $40\text{—}20 \text{ }^\circ\text{С}$ вдоль поверхности DEF).

Этап 2. Граничные условия те же. Начальные условия: в области $ABCDI$ задавали распределение температуры, рассчитанное на этапе 1; в области $DEFGHI$ принимали однородное распределение температуры ($20 \text{ }^\circ\text{С}$).

Этап 3. Граничные условия те же. Начальные условия: во всей области задавали распределение температуры, рассчитанное на этапе 2, кроме полости в пресс-форме, где начальная температура определяется температурой инжектированной в нее термопластичной массы, разогретой до $80 \text{ }^\circ\text{С}$.

Этап 4. На поверхностях AB и FG задавали температуру $20 \text{ }^\circ\text{С}$; на остальной части граничной поверхности — условие конвективного теплообмена с воздухом ($\alpha = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, $\Theta = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ на поверхностях BCD , EF и $\Theta = 40\text{—}30 \text{ }^\circ\text{С}$ вдоль поверхности DE). Начальное распределение температуры принимали равным рассчитанному на этапе 3 — в области пресс-формы $DEHI$ и $20 \text{ }^\circ\text{С}$ — в остальных областях, заполненных воздухом.

Свойства материалов конструктивных элементов установки инжекционного литья приведены в таблице.

Теплофизические свойства материалов

Материал	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
Сталь	469 [5]	7800 [5]	39 [5]
Масса на основе AlN	791 [6]	2490*	1,63*
Масса на основе WC	188 [7]	7600*	1,33*
Масса на основе SiC	750 [6]	2300*	1,17*
Воздух	1005 [6]	1,3 [6]	0,025 [6]

* Данные, полученные в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины экспериментально.

Расчет стационарного распределения температуры в рабочем тракте установки инжекционного литья. Характер распределения температуры в установке инжекционного литья, полученный в результате численного решения стационарных задач теплопроводности на этапе 1 для различных значений коэффициента теплопроводности термопластичной массы, представлен на рис. 2. В рабочем тракте температура распределена практически однородно и в большей части равна $80 \text{ }^\circ\text{С}$. Максимальное расчетное значение перепада температуры не превышает $5 \text{ }^\circ\text{С}$.

В результате моделирования процесса нагрева термопластичной массы на основе AlN, WC и SiC показано, что в рабочем тракте температура распределена практически однородно и достигает значения температуры воды в нагревателе. Такие условия нагрева позволяют формировать практически однородную термопластичную массу инжектируемого материала.

Моделирование процессов теплопереноса при инжекционном литье изделий

Сопло. Рассмотрим результаты компьютерного моделирования процессов теплопереноса в элементах установки инжекционного литья сопел, полученные для этапов 2—4. Основная цель расчетов на этих этапах состоит в опре-

делении температурно-временных зависимостей выдержки формуемого изделия в пресс-форме до температуры 40 °С, что обеспечивает надежное за- твердевание связующего инжектированной массы.

Результаты моделирования процесса прогрева пресс-формы для изготов- ления сопел большого типоразмера (этап 2) представлены на рис. 3, а. Карти- на изополос свидетельствует о достаточно динамичном нагреве пресс-формы в области ее примыкания к рабочему цилиндру, где через 15 с температура достигает 58 °С.

На рис. 3, б представлена картина изменения температурного поля в пресс-форме после инжектирования в ее полость термопластичной массы (этап 3). Видно, что вначале максимум температуры локализуется в части сопла, контактирующей с рабочим трактом. Наибольшие градиенты темпера- туры имеют место в поперечных сечениях стенки сопла. Приблизительно через 10 с остывания пресс-формы устраняется зона локального максимума температуры вдоль стенки сопла, а через 20 с во всей области сопла темпера- тура распределяется сравнительно равномерно. При этом максимальное зна- чение температуры в сопле составляет 56 °С.

В процессе остывания пресс-формы вне установки (этап 4) точка макси- мальной температуры постоянно находится в верхней части сопла, которая остывает более медленно (рис. 3, в). Полное время остывания до температуры 40 °С составляет 36 с.

Характер изменения максимальной температуры во времени для термо- пластичной массы на основе AlN, инжектированной в пресс-форму для изготов- ления сопел, приведен на рис. 4, а. На этапе 3 наблюдается первоначаль- ный участок остывания массы, после которого начинается ее нагрев. В этот момент целесообразно отсоединить пресс-форму от установки. Время сво- бодного остывания массы до температуры 40 °С (этап 4) зависит от размер- ных характеристик пресс-формы. Общее время остывания на этапах 3 и 4 составляет 32, 40 и 55 с соответственно для малого, среднего и большого сопел.

Аналогичные температурно-временные зависимости для термопластич- ных масс на основе WC и SiC приведены на рис. 4, б, в. При этом время ост- ывания на этапах 3 и 4 для массы на основе WC составляет 30, 36 и 49 с, для массы на основе SiC — 33, 40 и 56 с соответственно для малого, среднего и большого сопел.

На рис. 5, а представлены сводные графики характерного времени осты- вания термопластичных масс на основе AlN, WC и SiC в пресс-форме для инжекционного литья сопел в зависимости от их наружного диаметра. Общее время остывания на этапах 3 и 4 увеличивается по линейному закону с уве- личением размерных характеристик сопла. При этом время, необходимое для остывания массы на основе WC, несколько ниже, чем для масс на основе других исследованных материалов. Полученные зависимости используют в качестве тарировочных для отладки технологических процессов инжекцион- ного литья сопел различных типоразмеров.

Шар с осевым цилиндрическим отверстием. Результаты моделирования процесса прогрева пресс-формы для изготовления шаров с отверстием сред- него типоразмера (этап 2) показывают, что пресс-форма достаточно дина- мично нагревается в области ее примыкания к рабочему цилиндру, где через 15 с температура достигает 61 °С.

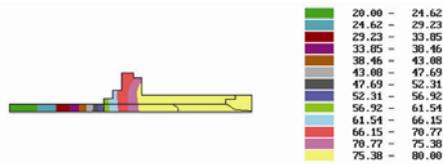


Рис. 2. Распределение температуры в установке инъекционного литья на этапе 1 для термопластичной массы на основе АИИ.

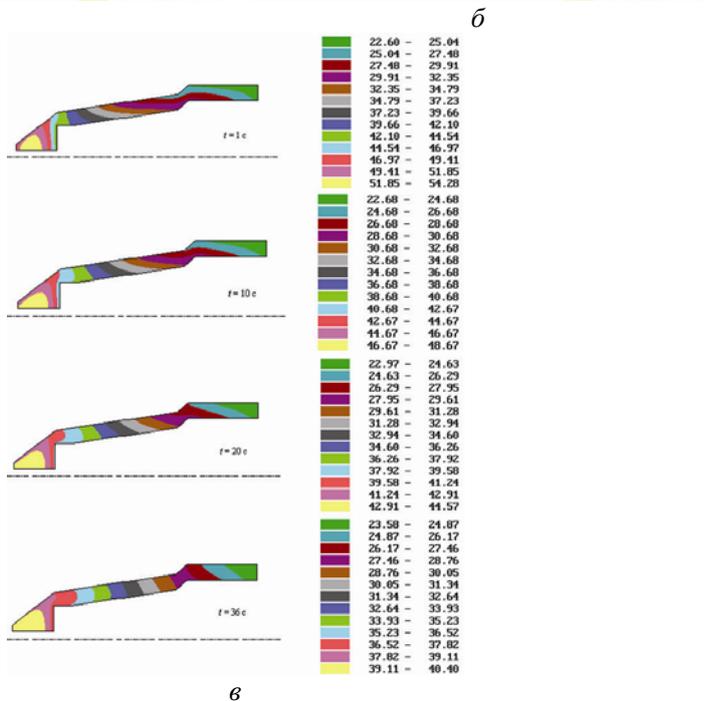
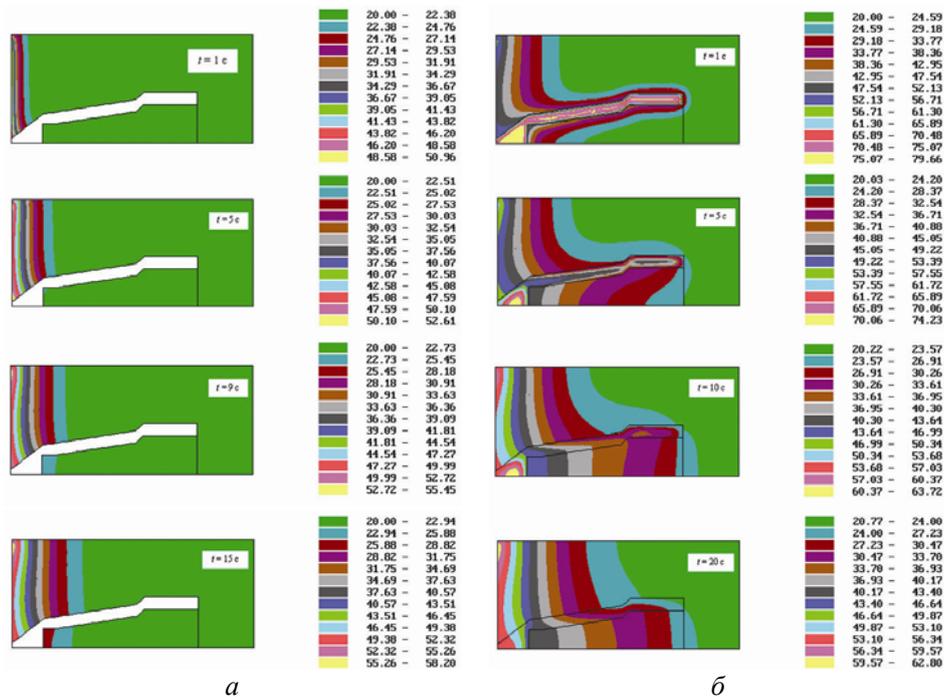


Рис. 3. Характер изменения поля температуры в пресс-форме для инъекционного литья сопел из термопластичной массы на основе АИИ на этапах 2 (а), 3 (б) и 4 (в).

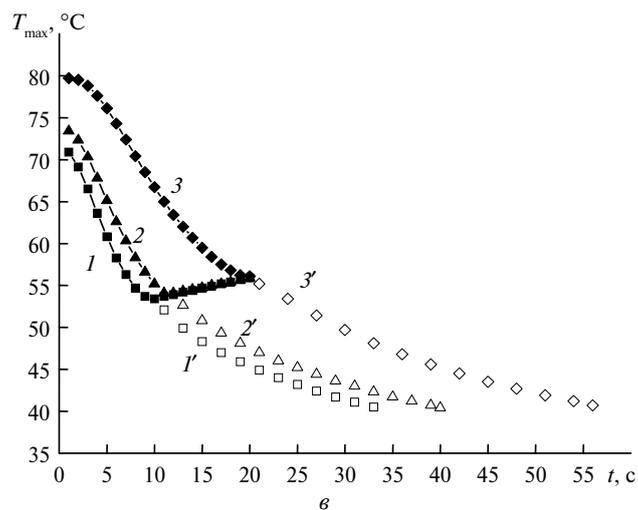
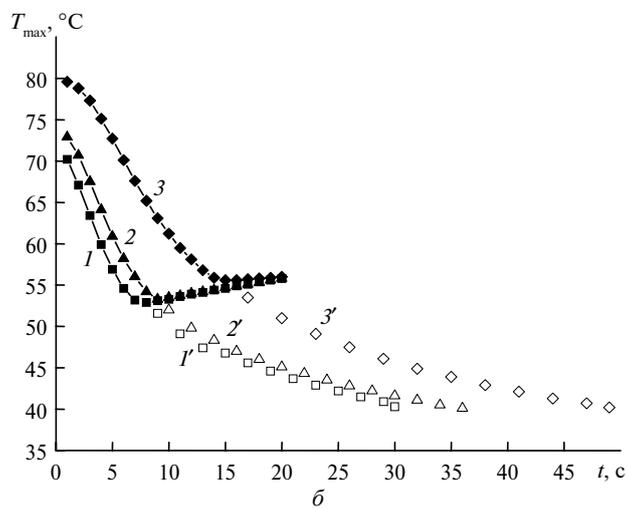
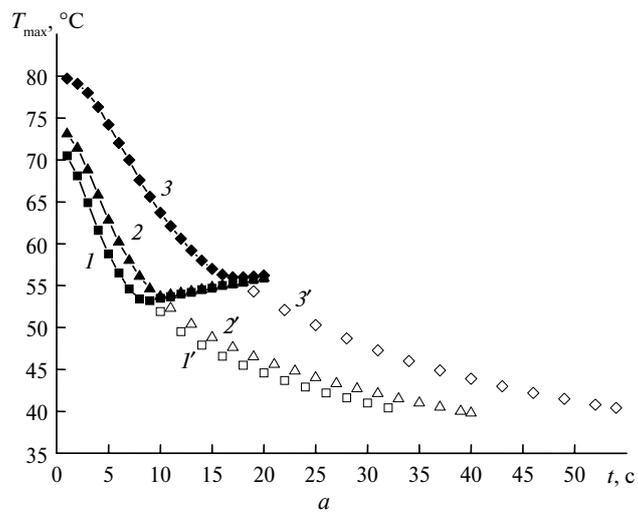


Рис. 4. Температурно-временные зависимости остывания термопластичной массы на основе AlN (а), WC (б), SiC (в) в полости пресс-формы для изготовления сопел: этап 3, типоразмеры малый (■), средний (▲), большой (◆); этап 4, типоразмеры малый (□), средний (△), большой (◇).

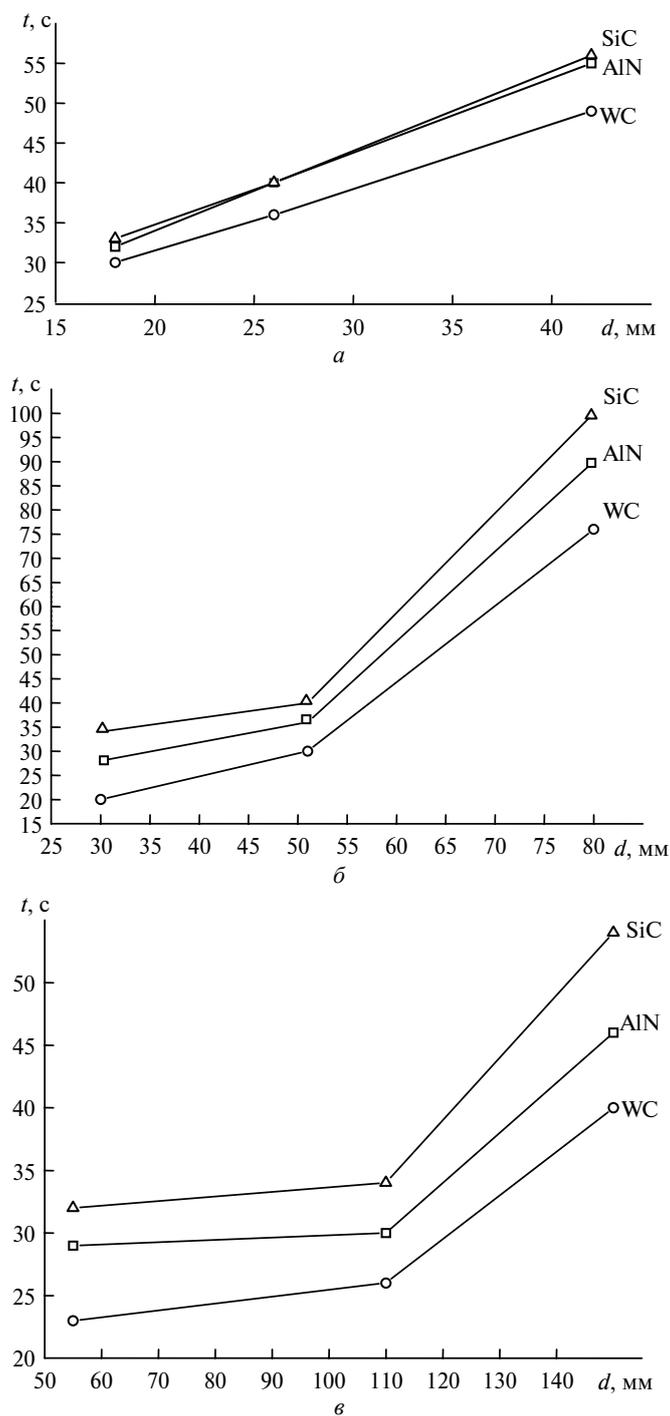


Рис. 5. Зависимость времени остывания термопластичных масс на основе SiC (Δ), AlN (\square), WC (\circ) в полости пресс-формы (на этапах 3 и 4) от наружного диаметра входного отверстия сопел (a), от диаметра шаров с отверстием (b), от наружного диаметра колец (c), от диаметра шаров (d).

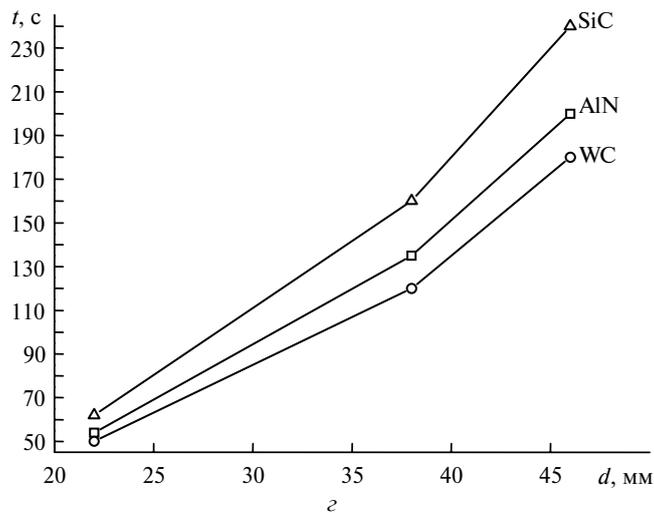


Рис. 5. (Продолжение).

Картина изменения температурного поля в пресс-форме после инжектирования в ее полость термопластичной массы (этап 3) следующая: вначале максимум температуры локализуется в области шара, при этом наибольшие градиенты температуры имеют место на границе контакта шара с элементами пресс-формы; приблизительно через 14 с точка максимума температуры смещается к области примыкания пресс-формы к рабочему цилиндру; через 20 с максимальное значение температуры в шаре составляет 48 °С.

В процессе остывания пресс-формы вне установки (этап 4) вначале наблюдается локальный максимум температуры в центре сфероидального сегмента шара, который постепенно устраняется, и уже через 18 с остывания перепад температуры в шаре не превышает 10 °С.

Общее время остывания массы на основе AlN до температуры 40 °С на этапах 3 и 4 составляет 28, 36 и 90 с соответственно для малого, среднего и большого шаров, для массы на основе WC — 20, 30 и 76 с, для массы на основе SiC — 34, 40 и 100 с (рис. 5, б).

Кольцо. Результаты моделирования процесса прогрева пресс-формы для изготовления колец малого типоразмера (этап 2) показывают, что в области примыкания пресс-формы к рабочему цилиндру через 15 с температура достигает 63 °С.

Картина изменения температурного поля в пресс-форме после инжектирования в ее полость термопластичной массы (этап 3) следующая: начальный максимум температуры локализуется в области кольца, при этом наибольшие градиенты температуры образуются на границе контакта кольца с элементами пресс-формы; приблизительно через 14 с точка максимума температуры смещается к области примыкания пресс-формы к рабочему цилиндру; через 20 с максимальное значение температуры в кольце составляет 50 °С, а картина ее распределения становится сравнительно равномерной.

Температура в пресс-форме на этапе ее остывания вне установки распределяется равномерно. Ее максимум всегда расположен в месте предыдущего примыкания пресс-формы к рабочему цилиндру установки.

Общее время остывания массы на основе AlN до температуры 40 °С на этапах 3 и 4 составляет 29, 30 и 46 с соответственно для малого, среднего и

большого кольца, массы на основе WC — 23, 26 и 40 с, массы на основе SiC — 32, 34 и 54 с (рис. 5, в).

Шар. Результаты моделирования процесса прогрева пресс-формы для изготовления шаров малого типоразмера (этап 2) показали, что пресс-форма достаточно быстро нагревается в области ее примыкания к рабочему цилиндру, где через 15 с температура достигает 61 °С.

На этапе 3 максимум температуры вначале локализуется в центре шара, при этом наибольшие градиенты температуры имеют место на границе контакта шара с элементами пресс-формы. Через 20 с точка максимума температуры смещается в область примыкания пресс-формы к рабочему цилиндру, однако распределение температуры в области шара все еще достаточно неравномерно.

В процессе остывания пресс-формы вне установки (этап 4) вначале наблюдается локальный максимум температуры в центре шара, который постепенно смещается в сторону предыдущего примыкания пресс-формы к рабочему цилиндру. Через 36 с остывания перепад температуры в шаре не превышает 7 °С.

Общее время остывания массы на основе AlN до температуры 40 °С на этапах 3 и 4 составляет 54, 135 и 200 с соответственно для малого, среднего и большого шаров, массы на основе WC — 50, 120 и 180 с, массы на основе SiC — 62, 160 и 240 с (рис. 5, з).

Представленные на рис. 5 графики используют при изготовлении соответствующих изделий.

Выводы

Разработана численная методика поэтапного моделирования процессов теплопереноса в установке инжекционного литья керамических материалов, учитывающая многоэлементность конструкции, разномодульность ее материалов, условия конвективного теплообмена с окружающей средой.

Рассчитано стационарное распределение температуры в установке и показано, что перепад температуры в рабочей зоне составляет ~ 5 °С, что делает термопластичную массу практически однородной в объеме рабочего цилиндра.

Проведено поэтапное моделирование процессов теплопереноса в установке инжекционного литья во время прогрева пресс-формы, после инжектирования в ее полость термопластичной массы и при остывании пресс-формы вне установки. Рассмотрен процесс инжекционного литья сопел, шаров с отверстием и без него, колец из термопластичной массы на основе AlN, WC, SiC. Выявлены опасные зоны концентрации температуры для каждой пресс-формы и инжектированного в нее материала. Установлены зависимости времени остывания до температуры затвердевания связующего от характерных размерных параметров каждого литого изделия и материала.

1. *Bilovol V. V.* Mould filling simulations during powder injection moulding: Ph. D. Thesis. — The Netherlands, Delft: Delft Univ. Technol., 2003. — 136 p.
2. *Леуцук А. А., Новиков Н. В., Левитас В. И.* Моделирование термомеханического состояния реакционной ячейки АД при спонтанной кристаллизации алмазов // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. — Синтез алмаза и подобных материалов. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля; ИПЦ “АЛКОН” НАНУ, 2003. — Т. 1., Гл. 3. — С. 96—118.
3. *Novikov N. V., Ivzhenko V. V., Popov V. A. et al.* Equipment for injection molding of thermosetting materials based on ceramic and metal-ceramic powders // Powder Metall. Met. Ceram. — 2004. — 43, N. 9—10. — P. 538—545.

4. Новиков Н. В., Ивженко В. В., Лецук А. А. и др. Экспериментальные исследования и моделирование инжекционного литья изделий сложных форм из технической керамики // Сверхтв. материалы. — 2004. — № 5. — С. 3—19.
5. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справ. — М.: Атомиздат, 1968. — 484 с.
6. Таблицы физических величин: Справ. / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
7. Туманов В. И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама—кобальт: Справ. — М.: Металлургия, 1971. — 96 с.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 30.10.08