

УДК 678.073:648.742.3

**А. В. Спиглазов<sup>1</sup>, Е. И. Кордикова<sup>1</sup>, И. С. Баулин<sup>1</sup>,  
Я. И. Поженько<sup>2</sup>, Г. Н. Кравченя<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет  
<sup>2</sup>ЗАО «Атлант», Минский завод холодильников

### **ФОРМУЕМОСТЬ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В ИЗДЕЛИЯ ПРИ УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА**

При формировании изделий из термопластичных полимеров и композиций на их основе, в том числе и в листовых заготовках, протекают тепловые и механические процессы, которые требуют специального исследования: нагрев и охлаждение, вязкопластическое течение, уплотнение и усадка, деформации вязкого растяжения, консолидация.

Для листовых заготовок из вторичного полипропилена определена кинетика охлаждения в двух режимах: конвективный теплообмен на воздухе и контактный теплообмен в охлаждаемой форме. Листовые заготовки для исследований получали на экструзионной головке коллекторного типа. Эксперимент проходил в максимально приближенных к реальности условиях при формировании изделий. Измерение температуры проводили на поверхности и в центре заготовки.

Для получения профиля температур по всей толщине заготовки проводили численный анализ на основе решения уравнения теплопроводности для одномерного потока. Показано, что результаты аналитического расчета и эксперимента хорошо коррелируют.

Полученные зависимости использовали для определения величины вязкотекучего слоя по толщине заготовки, за счет которого обеспечивается формуемость материала в изделие, а также для выявления оптимальных температурно-временных параметров при обеспечении адгезионных связей между двумя нагретыми заготовками в процессе формирования составного изделия.

**Ключевые слова:** вторичный полипропилен, рециклинг, листовая заготовка, формообразование изделий, теплообмен, составное изделие.

**A. V. Spiglazov<sup>1</sup>, E. I. Kordikova<sup>1</sup>, I. S. Baulin<sup>1</sup>,  
Ya. I. Pozhen'ko<sup>2</sup>, G. N. Kravchenya<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University  
<sup>2</sup>ATLANT Inc., Minsk Refrigerators Plant

### **THE FORMABILITY OF SHEET BLANKS IN THE PRODUCT UNDER CONDITIONS OF INTENSE HEAT**

When forming products from thermoplastic polymers and compositions on their basis, including sheet blanks, are passing heat and mechanical processes, which require special study: heating and cooling, viscous-plastic flow, sealing and shrinkage, the deformation of viscous stretching, consolidation.

For sheet workpieces made of recycled polypropylene it was determined the kinetics of cooling in two modes: convective heat transfer in air and contact heat exchange in the chilled form. The workpieces sheets for the study were obtained at the extrusion head of the manifold type. When molding product the experiment took place in conditions that are very close to real. Temperature measurement was carried out on the surface and in the center of the workpiece.

To obtain the temperature profile across the thickness of the blank numerical analysis on the basis of the solution of the heat equation for one-dimensional flow was carried out. It is shown that the results of analytical calculation and experiment correlate well.

The derived dependences used to determine the magnitude of the visco-fluid layer by thickness of the workpiece, which ensures the formability of the material in the final product, as well as to identify the optimal temperature and time parameters, while ensuring the adhesion bonds between the two heated molds in the process of forming a composite product.

**Key words:** recycled polypropylene, recycling, leaf harvesting, shaping products, heat transfer, composite product.

**Введение.** Одним из направлений развития технологии пласт-формования является поиск путей расширения номенклатуры изделий за счет увеличения габаритных размеров изделий, улучшения их внешнего вида. Для решения по-

ставленных задач возможно использование листовых заготовок в вязкотекучем состоянии необходимых размеров из термопластичных полимеров и композиций на их основе [1]. Это приведет к снижению влияния эффектов, связанных

с течением расплава, на стадии формообразования изделий. Кроме того, использование нескольких листовых заготовок одновременно позволит осуществлять выпуск составных изделий.

При формировании изделий из термопластичных полимеров и композиций на их основе, в том числе и в листовых заготовках, протекают тепловые и механические процессы: нагрев и охлаждение, вязкопластическое течение, уплотнение и усадка, деформации вязкого растяжения, консолидация, которые требуют специального исследования.

**Основная часть.** В процессе переработки материала при транспортировке и подготовительных операциях часть времени заготовка находится на воздухе, при формировании изделий для сокращения времени цикла рабочие поверхности оснастки охлаждаются до рабочей температуры прессования. Для большинства материалов эффективная температура находится в диапазоне от 40 до 70°C.

Для оценки всех стадий процесса кинетику охлаждения снимали в двух режимах: конвективного теплообмена на воздухе в нормальных условиях и контактного теплообмена путем помещения заготовки в охлаждаемую до температуры 60°C оснастку.

Исследования проводили для вторичного полипропилена (ВПП), который представляет собой агломерат полипропиленовой мешковины.

Кинетику охлаждения для всех исследуемых материалов определяли на листовых заготовках толщиной 5–7 мм. Для изготовления расплавленных листовых заготовок заданного размера надлежащего качества из вторичных термопластов апробирована экструзионная головка коллекторного типа [1].

Данные по экспериментальным исследованиям кинетики охлаждения вторичного полипропилена представлены на графиках (рис. 1–2, точки – экспериментальные данные, линии – результат аппроксимации).

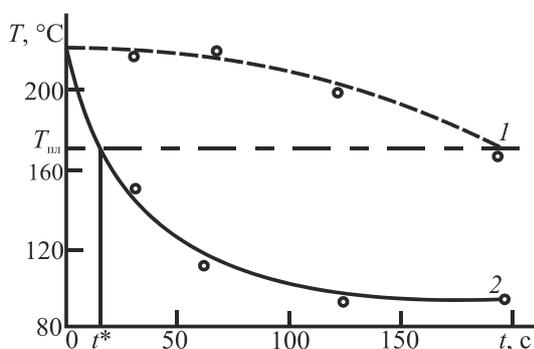


Рис. 1. Распределение температуры листовых заготовок из ВПП при охлаждении на воздухе: 1 – изменение температуры в центре заготовки; 2 – изменение температуры на поверхности

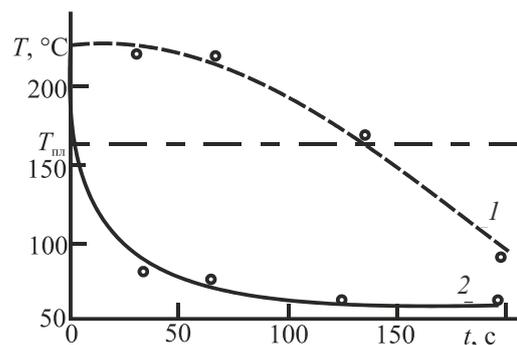


Рис. 2. Распределение температуры листовых заготовок из ВПП при охлаждении в оснастке: 1 – изменение температуры в центре заготовки; 2 – изменение температуры на поверхности

За счет низкой теплопроводности полимерных материалов и невысокого коэффициента конвекции падение температуры носит замедленный характер. В исследованном временном диапазоне (от 0 до 180 с) можно отметить, что температура в центре образцов не опускается ниже температуры плавления матричного полимера (рис. 1).

Время охлаждения  $t^*$  поверхностных слоев до температуры плавления  $T_{пл}$  за счет конвекции на воздухе составляет 25–35 с. Исходя из данного промежутка, определяется время на операцию транспортировки заготовки в оснастку с помощью специальных средств, поддерживающих форму листа.

Однако следует учесть, что при помещении заготовки в оснастку за счет высоких коэффициентов теплопроводности металла происходит интенсивное переохлаждение заготовки, и температура существенно падает как в центре образца, так и на его поверхности (рис. 2).

Эксперимент дает возможность определить температуру только в двух точках (на поверхности и в центре), что недостаточно для точного описания процесса теплообмена. Для получения более полной картины распределения температурных полей применяли аналитические методы расчетов, что позволило определить температуру в любой точке по толщине и построить профиль температур.

В основе аналитических методов лежит уравнение теплопроводности для одномерного потока. Дифференциальное уравнение решали при граничных условиях, соответствующих реальному окружению по температурам и коэффициентам теплоотдачи. Результат решения по определению температурного поля по толщине заготовки при условии ее конвективного охлаждения на воздухе представлен на рис. 3.

За счет тепловой инерции материалов наблюдается сохранение температуры в центральной зоне шириной не менее половины

толщины образца в интервале 30–45 с с момента начала охлаждения.

Сравнивая экспериментальные данные по ВПП (рис. 1) с расчетными профилями на рис. 3, можно сделать вывод о высокой корреляции результатов, что позволяет применять аналитические методы оценки кинетики охлаждения при расчетах параметров процесса формообразования изделий из листовых заготовок.

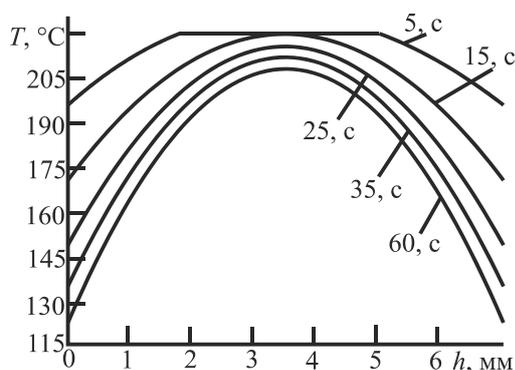


Рис. 3. Температурное поле по толщине заготовки из ВПП от времени выдержки на воздухе (решение уравнения теплопроводности)

В ходе расчетов получены аналитические зависимости, которые используются для определения величины вязкотекучего слоя по толщине заготовки, за счет которого обеспечивается формоустойчивость материала в изделии, а также при определении оптимальных температурных параметров для обеспечения адгезионной связи между двумя нагретыми заготовками.

Расчетный профиль температурного поля по толщине одной из контактирующих между собой заготовок показан на рис. 4.

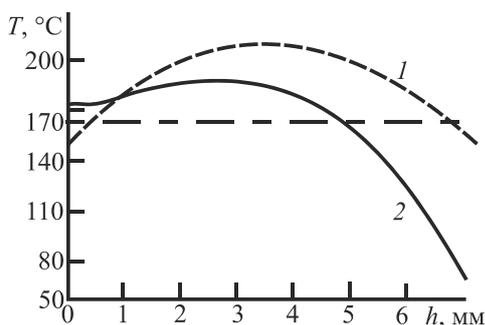


Рис. 4. Распределение температуры в образце после контакта с другим (расчет):

- 1 – температурное поле исходной заготовки после охлаждения на воздухе в течение 30 с;
- 2 – температурное поле в одной из заготовок после совместного контакта в оснастке

На рисунке изображен один лист материала. При  $h = 0$  принималось отсутствие теплообмена вследствие равенства температур двух загото-

вок в момент контакта. По другой стороне материала принимался контактный теплообмен с охлаждаемой оснасткой.

Схема контакта заготовок между собой и формообразующей оснасткой изображена на рис. 5.

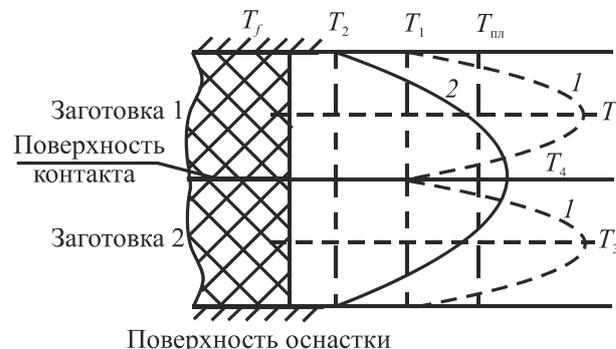


Рис. 5. Схема распределения температурных полей при формировании составного изделия:

- 1 – исходные профили температур в заготовках;
- 2 – профиль температур в момент формирования

Таким образом, для исходных заготовок при начальном уровне температур поверхности  $T_1$ , а в центре  $T_3$  в момент контакта между собой и с оснасткой в какой-то непродолжительный момент времени происходит разогрев поверхностей контакта заготовок между собой до температуры  $T_4$ .

При этом наблюдается снижение уровня температуры для заготовки в целом за счет интенсивного теплообмена с оснасткой, при этом происходит практически мгновенное падение температуры поверхности заготовки до уровня оснастки ( $T_2 = T_j$ ).

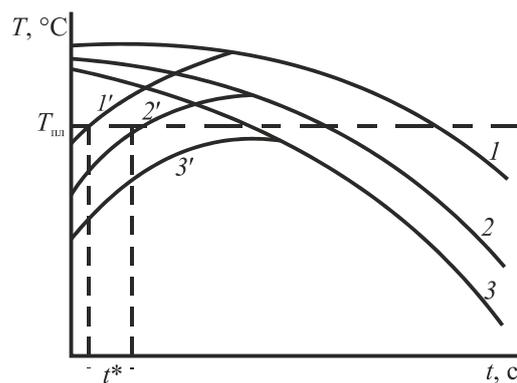


Рис. 6. Зависимость температурных полей от условий формирования составного изделия (эксперимент):

- 1, 2, 3 – изменение температуры в центре заготовок;
- 1', 2', 3' – изменение температуры по поверхности контакта заготовок

Оптимальным является условие, когда температура в центре образца в период достижения своего экстремального значения при разогреве

станет выше температуры плавления матричного полимера ( $T_4 \geq T_{пл}$ ) с точки зрения обеспечения более высокой степени консолидации материала. Достижение условия, когда  $T_4 \geq T_{пл}$ , зависит от теплофизических свойств материала, исходного распределения температурных полей в заготовках и параметров формирующего инструмента и его материалов. Так, на графике (рис. 6) представлена зависимость между температурой по поверхностям контакта и в центре заготовки ВПП при разном исходном времени нахождения их на воздухе: 1 – 0 с; 2 – 30 с; 3 – >60 с.

Как видно из графика, время достижения  $t^*$  условия, когда  $T_4 \geq T_{пл}$ , возрастает при более

низких исходных температурах в заготовке и, следовательно, требуется большее время выдержки для обеспечения адгезионной связи между заготовками. Однако при определенных условиях температура в зоне контакта никогда не сможет достигнуть температуры плавления ( $T_4 < T_{пл}$ ), что приведет к невозможности установления адгезионной связи между заготовками.

**Заключение.** Изучен теплообмен между отдельными заготовками материала при совместном формировании. Проведены экспериментальные исследования по установлению явлений, протекающих при термическом воздействии между элементами составного изделия.

### Литература

1. Формование составных изделий из расплава высоковязких композиций на основе термопластичных полимеров / А. В. Спиглазов [и др.] // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. Ч. 1. Минск: БГТУ, 2014. С. 158–162.

### References

1. Spiglazov A. V., Kordikova E. I., Baulin I. S., Pozhen'ko Ya. I. Molding composite articles from a meli of high viscosity compositions based on thermoplastic polymers. *Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie, ekologicheski bezopasnye tekhnologii: materialy konferentsii: v 2 ch. Ch. 1* [Resource and energy-saving technologies and equipment, environmentally friendly technology: materials of conference: vol. 1], Minsk, 2014, pp. 158–162 (In Russian).

### Информация об авторах

**Спиглазов Александр Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики материалов и конструкций. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: spiglazov@belstu.by

**Кордикова Елена Ивановна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики материалов и конструкций. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kordikova@tut.by

**Баулин Иван Сергеевич** – аспирант кафедры механики материалов и конструкций. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: baulin@belstu.by

**Поженко Ян Игоревич** – инженер. ЗАО «Атлант». Минский завод холодильников (220035, г. Минск, пр. Победителей, 61). E-mail: pozhanka@gmail.com

**Кравченя Галина Николаевна** – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kravchenyagn1994@gmail.com

### Information about the authors

**Spiglazov Aleksandr Vladimirovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: spiglazov@belstu.by

**Kordikova Elena Ivanovna** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kordikova@tut.by

**Baulin Ivan Sergeevich** – PhD student, Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: baulin@belstu.by

**Pozhen'ko Yan Igorevich** – engineer. ATLANT Inc., Minsk Refrigerators Plant (61, Pobeditelei Ave., 220035, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pozhanka@gmail.com

**Kravchenya Galina Nikolaevna** – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kravchenyagn1994@gmail.com

Поступила 19.02.2016