

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-134-144

Романенко К.С., Поляков А.Н., *Никитина И.П.

Оренбургский государственный университет

*E-mail: innanikitina@list.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СТАНКЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАСТРУБА В ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования тепловых процессов в станке для формирования раструба в полипропиленовых трубах. Особенностью спроектированного станка является наличие двух рабочих зон. В первой зоне осуществляется разогрев полипропиленовых труб, а во второй зоне выполняется их пластическое деформирование. В каждой зоне реализуются отдельные тепловые модели в нестационарной постановке. В зоне разогрева были решены две задачи. Решение первой задачи позволило определить алгоритм разогрева нагревательных элементов, используемых для обеспечения требуемой температуры деформируемого участка трубы. Решение второй задачи позволило определить возникающие температурные расширения как нагреваемого участка трубы, так и расширения внутренней и наружной печей для двух размеров труб. В зоне пластического деформирования также представлены результаты компьютерного моделирования для двух моделей. В первой модели рассматривалась подача охлаждающей воды в штампы и оправку. Во второй модели, наоборот исследован вариант разогрева штампов и оправки. Особенностью предложенных тепловых моделей в зоне разогрева является использование условной твердотельной среды с комбинированными характеристиками воздуха и деформируемого материала в упругой области. Особенностью использованных тепловых моделей в зоне пластического деформирования трубы являлось задание граничных и начальных условий в виде фиксированных значений температур. Полученные результаты моделирования были подтверждены экспериментально на изготовленном станке.

Ключевые слова: станок для формирования раструба, температурное состояние, тепловые модели, температура.

Введение. Полипропиленовые (ПП) трубы широко используются в качестве труб для питьевой воды или в качестве подземных дренажных труб благодаря их комплексным преимуществам, таким как простота формообразования и сварки, малый вес, высокая коррозионная стойкость и хорошие механические свойства [1, 2]. Много работ посвящено исследованию процессов создания полипропиленовых труб, повышению качества их изготовления за счет совершенствования технологий их изготовления [3–6]. При этом используют не только экспериментальные, но и вычислительные эксперименты с использованием метода конечных элементов [7, 8].

Соединение полипропиленовых труб осуществляется разными способами, одним из наиболее распространенных является соединение с помощью раструба. В этом случае один конец трубы выполняется с кольцевой бороздкой, по которой осуществляется соединение двух труб. К сожалению, в России отечественных производителей раструбных станков нет. В современных условиях возможность удовлетворения потребностей предприятий в импортном оборудовании существенно сократилось. Одним из направлений работ отечественных машиностроительных предприятий общего машиностроения является изготовление дефицитного оборудования, в том числе и в единичном экземпляре.

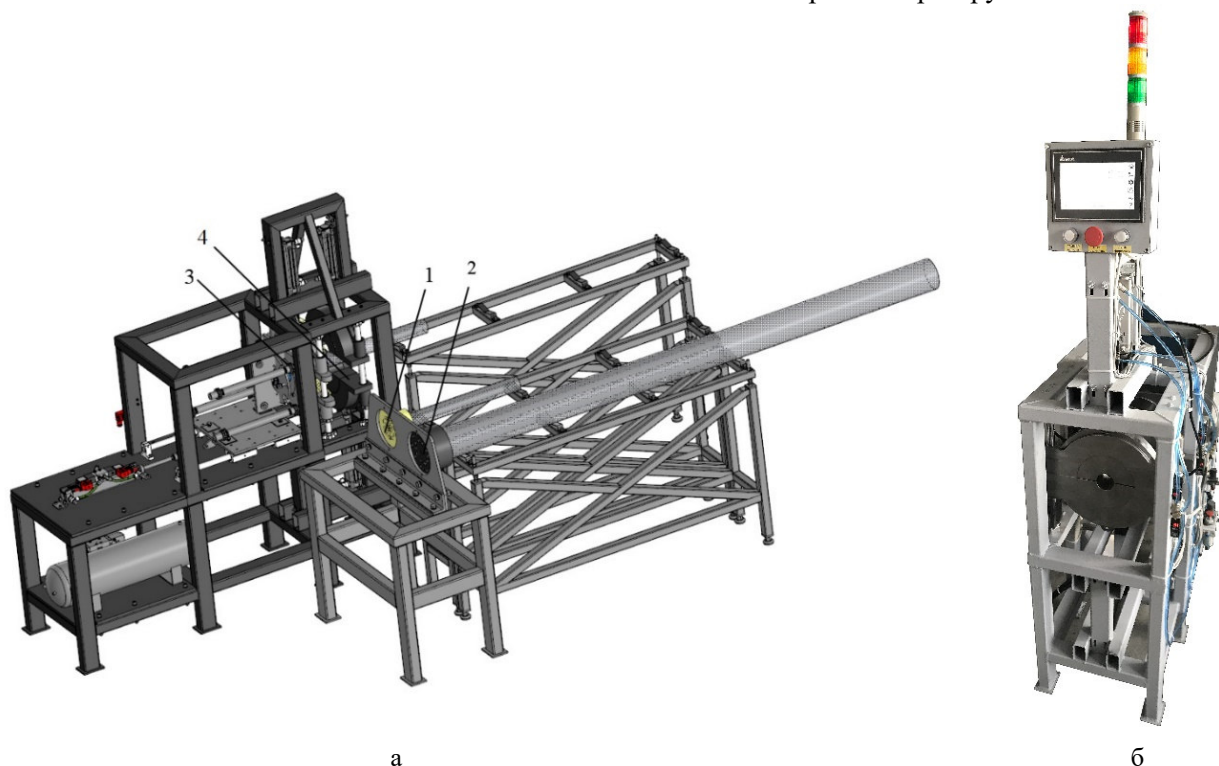
Разработка конструкции машины для формирования раструба в полипропиленовых трубах. Авторами был выполнен проект раструбного станка (рис. 1а) с последующим изготовлением на машиностроительном предприятии (рис.1б). Станок позволяет выполнять раструб для труб двух диаметров 50 и 110 мм. Для этого сначала осуществляется нагрев концов труб в позициях 1 и/или 2, в зависимости от комплектации станка. После этого труба передается в позицию формирования раструба 3. Раструб формируется пластическим деформированием с использованием штампа. На рисунке 1 представлена комплектация станка, позволяющая одновременно выполнять разогрев концов труб разных размеров.

Разогрев каждой трубы выполняется при помощи пары печей: внутренней и наружной. Конструктивно каждая внутренняя печь представляет собой цилиндр с несколькими отверстиями, выполненными параллельно оси цилиндра. Наружные печи представляют собой полые толстостенные цилиндры, в стенках которых также выполнены отверстия параллельно оси цилиндра. В эти отверстия закладываются нагревательные элементы в виде патронных тэнов. При этом при проектировании станка учитываются теплофизические свойства полипропилена, его температура плавления и максимальная температура

эксплуатации. В зависимости от марки полипропилена при температурах от 130 °С и выше труба становится эластичной, что позволяет легко осуществлять его формообразование, в частности формировать раструб. Однако этот диапазон температур, при котором полипропиленовая труба приобретает эластичность относительно небольшой, так как температура плавления полипропилена находится в диапазоне 160–168 °С [1, 9, 10].

Формирование раструба осуществляется при помощи оправки и штампа. При укладке трубы

на ложементы и придание ей необходимого осевого положения, включаются захваты 3 (рис. 1), удерживающие трубу в требуемом положении. После этого включаются штампы 4 (рис. 1) и охватывают нагретый конец трубы. Затем в трубу входит оправка, которая формирует требуемую конфигурацию раструба. В оправке также предусмотрены отверстия, расположенные параллельно её оси, через которые подаётся вода для ее охлаждения. Через центральное отверстие оправки подаётся воздух для формирования буртика на поверхности раструба.



а

б

Рис. 1. Конструкция раструбного станка:

а – 1,2 – зона нагрева труб; 3,4 – зона формирования раструба; б – станок

Тепловые процессы при разогреве печи.

При создании раструбного станка были предварительно изучены имеющиеся в свободном доступе материалы подобных конструкций [11–15]. Все конструкции машин и станков для формирования раструба предусматривают предварительный разогрев конца трубы, на котором формируется раструб. Как выше отмечалось, что одной из отличительных особенностей предлагаемой конструкции является использование внутренней и наружной печей, разогрев которых производится за счёт установленных нагревательных элементов в отверстиях, центры которых расположены на концентрической окружности на равных расстояниях друг от друга. Здесь возникают две задачи, требующие решения. Первая задача – определить алгоритм разогрева нагревательных элементов, которые будут формировать требуемую температуру трубы. Вторая задача – определить возникающие температурные расширения, как

нагретого конца трубы, так и расширения внутренней и наружной печей (для двух размеров труб). Потребность в решении первой задачи обусловлена тем, что разогрев конца трубы следует обеспечить в достаточно узком диапазоне температур. Вместе с тем для сокращения технологической себестоимости необходимо сократить время на этот разогрев. Потребность в решении второй задачи тоже обусловлена тем, что в конструкциях печей заложены технологические радиальные зазоры для сопряжения «внутренняя печь-отверстие трубы» 1 и 3 мм для труб диаметром 50 и 110 мм, соответственно, а для сопряжения «внутренняя поверхность наружной печи-наружная поверхность трубы» – 1,5/2,5 мм для меньшего и большего диаметров труб, соответственно.

Поставленные задачи решались в ходе компьютерного моделирования в Ansys [16]. При ре-

шении тепловой задачи необходимо задать условия однозначности: геометрические, физические, начальные и граничные условия [17, 18].

Учитывая, что при проектировании станка сначала были разработаны все геометрические трехмерные модели составляющих компонентов, поэтому геометрические условия для решения поставленной задачи были заданы однозначно. Для решения тепловой задачи разогрева печи в геометрической модели кроме обеих печей и труб рассматривался поддерживающий каркас, сваренный из стальных уголков ГОСТ 8509-93. Однако, несмотря на то, что задание геометрических условий очевидно. Здесь они напрямую связаны с особенностями задания граничных условий. Теплопередача от печей трубе осуществляется через заполненный воздухом зазор. Для моделирования такого вида теплопередачи можно использовать либо конвективный теплообмен с заданным некоторым образом коэффициентом теплоотдачи для зазора [17, 18]. Или использовать второй часто используемый подход, заключающийся в моделировании воздушного зазора некоторым телом, заполненным виртуальным материалом, имеющим многие теплофизические характеристики, совпадающие с характеристиками воздуха (плотность, теплоемкость, теплопроводность) [19]. Материал дополняется характеристиками, свойственными твердым материалам, что позволяет решать задачу термоупругости, связанную с определением температурных перемещений [20, 21]. Этот подход не является новым, во многом он отражает решение классической задачи теплообмена при свободном течении текучей среды в ограниченном пространстве [17, 18]. В этом случае граничные условия записывают в виде:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\delta} (T_{1cm} - T_{2cm}) \text{ и } \lambda_{\text{экв}} = \lambda_f \cdot \varepsilon_k,$$

$$\varepsilon_k = \begin{cases} 1 & \text{при } Ra \leq 10^3 \\ 0,105 \cdot Ra^{0,3} & \text{при } 10^3 < Ra < 10^6 \\ 0,4 \cdot Ra^{0,2} & \text{при } 10^6 \leq Ra < 10^{10} \end{cases}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала печи, Вт/(м·К); $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); λ_f – коэффициент теплопроводности материала зазора, Вт/(м·К); δ – величина зазора, м; T – функция температуры, К; T_{1cm}, T_{2cm} – температура сопряженных стенок трубы и печи, К; n – направление вектора нормали к внешней границе; Ra – число Рейля; ε_k – коэффициент конвекции.

Реализация граничных условий (1) геометрически представлена на рисунке 2. Здесь вирту-

альный материал, заполняющий воздушные зазоры и пространства, обозначен под номерами 4 и 5. Зазор между наружной поверхностью трубы и наружной печью обозначен 5, внутреннее пространство трубы заполняет виртуальный материал 4.

Так как для нагрева печей используются тэны, то в качестве задаваемой величины граничных условий используется или тепловой поток (количество теплоты, переносимое в единицу времени) или плотность теплового потока. Так как тэн являлся покупным изделием и в качестве его эксплуатационной характеристики используется мощность, поэтому чтобы не осуществлять пересчет по площади, в качестве граничных условий задавались тепловые потоки (Вт). Для всех свободных поверхностей модели назначался конвективный теплообмен [17, 18].

Решение первой задачи, заключающейся в определении алгоритма разогрева нагревательных элементов, осуществлялось итерационно. При решении этой задачи использован перебор разных вариантов изменения значений тепловых потоков во времени, задаваемых в цилиндрических отверстиях печей. В качестве критериальных ограничений принимался нагрев зоны деформирования трубы до диапазона температур 150–160 °С. Одним из дальнейших развитий решения подобного класса задач является определение фактических значений тепловых потоков путем решения задачи оптимизации [22–24]. Постановка задачи оптимизации усложняется ступенчатым (во времени) характером тепловой нагрузки для каждой рассматриваемой поверхности. Результатом решения задачи является алгоритм регулирования нагревательных элементов печи. На рисунке 3 представлены график изменения тепловых потоков (кривые 2–7), обусловленные нагревом тэнов.

Кривая 1 представляет собой изменение температуры трубы во времени в наиболее нагретой точке (для краткости ее можно назвать температурной характеристикой [25]). Характеристики 2 и 3 показывают ступенчатое изменение тепловых потоков, действующих в верхних и нижних отверстиях (половина всех отверстий) наружной печи большого диаметра (110 мм), соответственно. Характеристики 4 и 5 – ступенчатое изменение тепловых потоков, действующих в верхних и нижних отверстиях (другая половина всех отверстий) наружной печи малого диаметра (50 мм). Характеристики 6 и 7 – ступенчатое изменение тепловых потоков, действующих в отверстиях внутренних печей большого и малого диаметров. Характеристика 1 иллюстрирует изменение температуры в наиболее нагретой точке трубы большого диаметра (для трубы малого

диаметра характеристика не показана). На рисунке 4 показано тепловое состояние зоны

нагрева, представленное температурным и термомодеформационным состояниями.

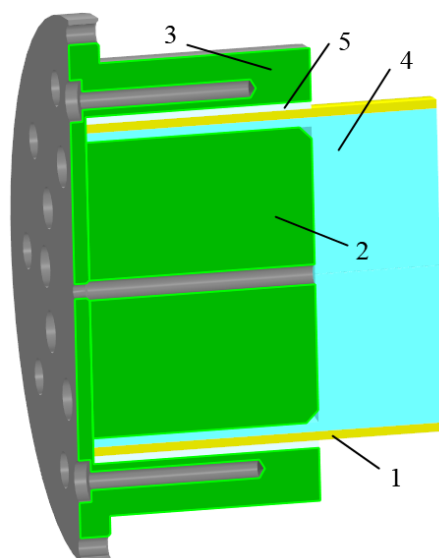


Рис. 2. Геометрическое представление соединений трубы с наружной и внутренней печами: 1 – труба; 2 – внутренняя печь; 3 – наружная печь; 4 и 5 – виртуальный материал

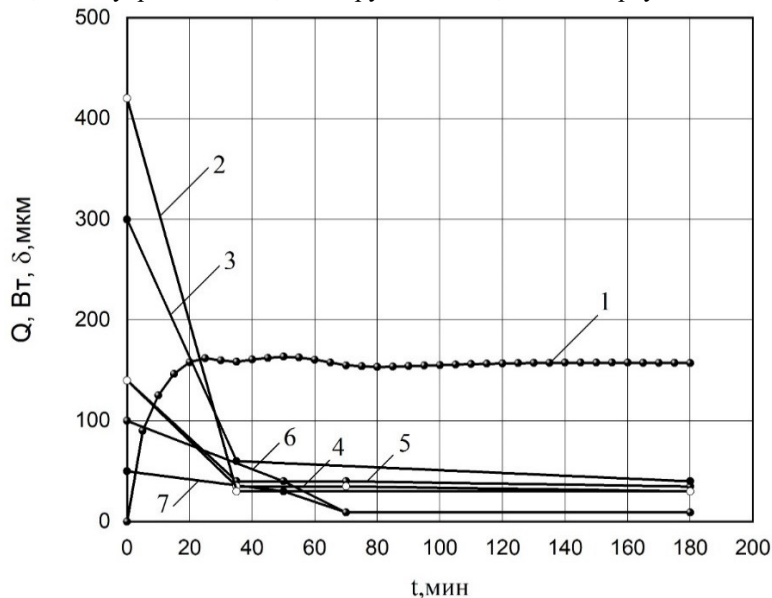


Рис. 3. Тепловые и температурная характеристики:

1 – температура нагреваемого участка трубы; 2-7 – кривые изменения тепловых потоков

Как показывает анализ полученных результатов, подобранный алгоритм разогрева внутренних и наружных печей позволил обеспечить равномерный нагрев полипропиленовых труб до стабильной температуры в диапазоне от 150 до 158 °С после 20 минут их размещения в зоне нагрева. При этом максимальные температурные перемещения по оси X не превысят 300 мкм (по оси Y – не более 65 мкм, здесь иллюстрация не приведена). Эти значения тепловых деформаций полностью удовлетворяют зазорам, принятым в конструкции станка.

Тепловые процессы в зоне пластического деформирования. Некоторые производители подобных станков для формирования раструба в

трубах предлагают осуществлять охлаждение штампов и оправки, используемой для формирования раструба. По согласованию с заказчиком в спроектированном станке также была реализована система подачи воды в оба штампа и в оправку. Анализируя физику процесса подачи воды в полость штампа, ввиду неразрывности потока, скорость жидкости на входе резко уменьшится. В этом случае, как показывают расчеты, число Рейнольдса для воды в полости штампа оказывается существенно меньше критического, равного 2320. Это даёт основание характеризовать режим течения воды в штампе как ламинарный [17, 18]. Тогда для определения коэффициентов теплоотдачи при прохождении воды через

полость штампов для их охлаждения был принят вариант теплообмена, реализуемый при свободном движении текучей среды в ограниченном пространстве [18]. В этом случае коэффициент теплоотдачи следует принимать из расчета эквивалентного коэффициента теплопроводности. Для нашей конструкции диапазон изменения чисел Рейля для обоих штампов, используемых для формообразования раструба для труб диаметром

50 и 110 мм, находится в диапазоне от 10^9 до 10^{10} , поэтому коэффициент теплоотдачи α принимается в виде [18]:

$$\alpha = 0,4 \cdot \lambda / \delta \cdot Ra^{0,2}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); δ – толщина стенки трубы, м; Ra – число Рейля.

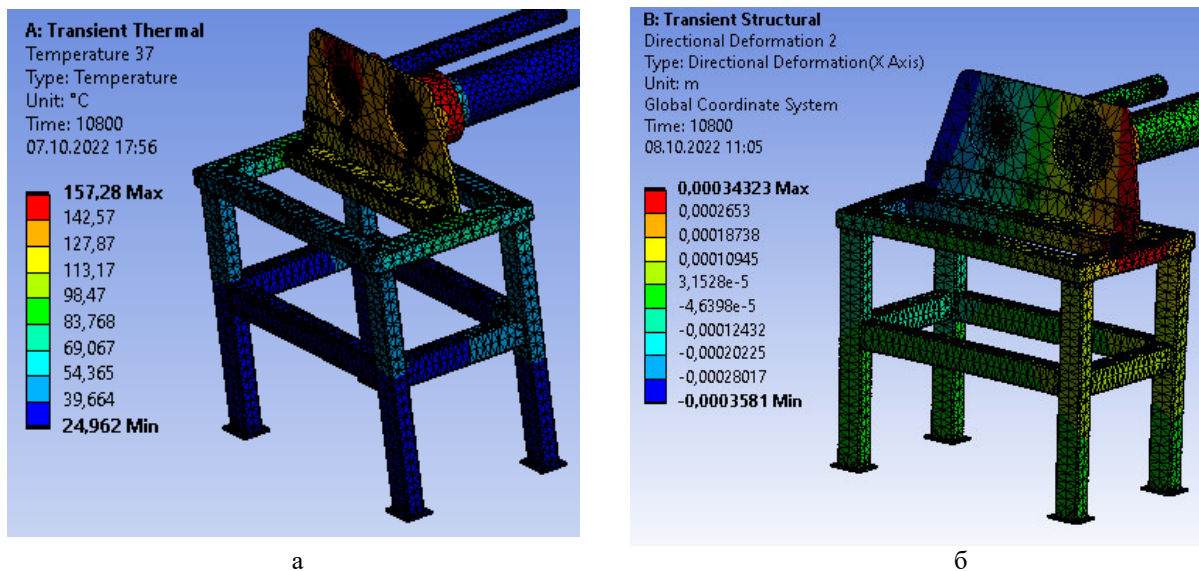


Рис. 4. Тепловое состояние зоны нагрева:
а) температурное состояние; б) термодформационное состояние

Охлаждение оправки осуществляется подачей жидкости в осевые каналы оправки К (рис. 5) равной длины и диаметра 4 мм. Соотношение длины и диаметра канала составляет 25. В зависимости от создаваемого в системе охлаждения

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,33} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot \varepsilon_L, \text{ при } Re \leq 2300, \quad (3)$$

$$Nu = K_0 \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_L, \text{ при } 2300 < Re < 10000, \quad (4)$$

$$Nu = 0,21 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_L, \text{ при } Re > 10000, \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля для воды, прокачиваемой через канал; Gr – число Грасгофа; ε_L – поправочный коэффициент, учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена; K_0 – коэффициент, значение которого изменяется от 3,6 до 33 в зависимости от изменения числа Рейнольдса в диапазоне от 2300 до 10000.

Расчеты для коэффициентов теплоотдачи α для осевых каналов оправок для труб диаметром

расхода жидкости будет формироваться различный режим течения жидкости, которому соответствуют различные процессы теплообмена. В этом случае число Нуссельта Nu может быть определено по формулам [18]:

50 и 110 мм показали, что диапазон изменения коэффициентов теплоотдачи α в зависимости от расхода охлаждающей жидкости для оправок находится в диапазоне от 8500 до 31000 Вт/(м²·К). При этом меньшие значения характерны для расхода жидкости, не превышающей 1 л/с, а большие значения для расхода жидкости – около 60 л/с.

Расчеты для коэффициентов теплоотдачи α для полостей штампов показали, что их величины существенно меньше и находятся в диапазоне от 50 до 550 Вт/(м²·К).

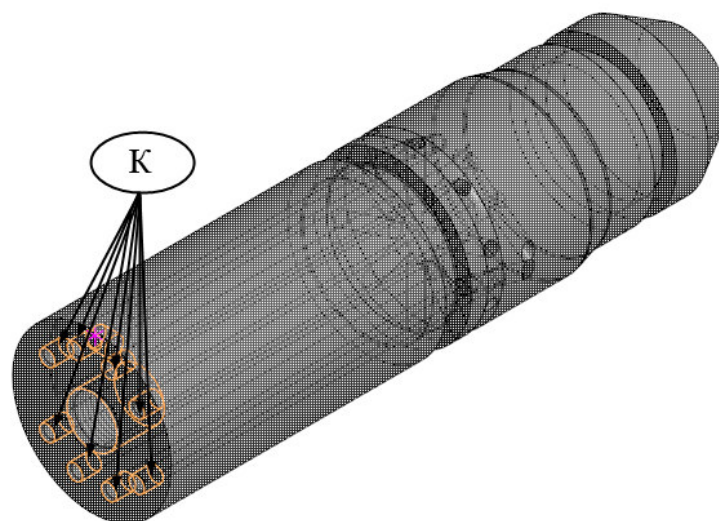


Рис. 5. Оправка (К – цилиндрические каналы)

Решение задачи, как и при решении задачи нагрева полипропиленовой трубы осуществля-

лось в Workbench Ansys. Для этого была разработана геометрическая, сеточная и расчетные модели (рис. 6).

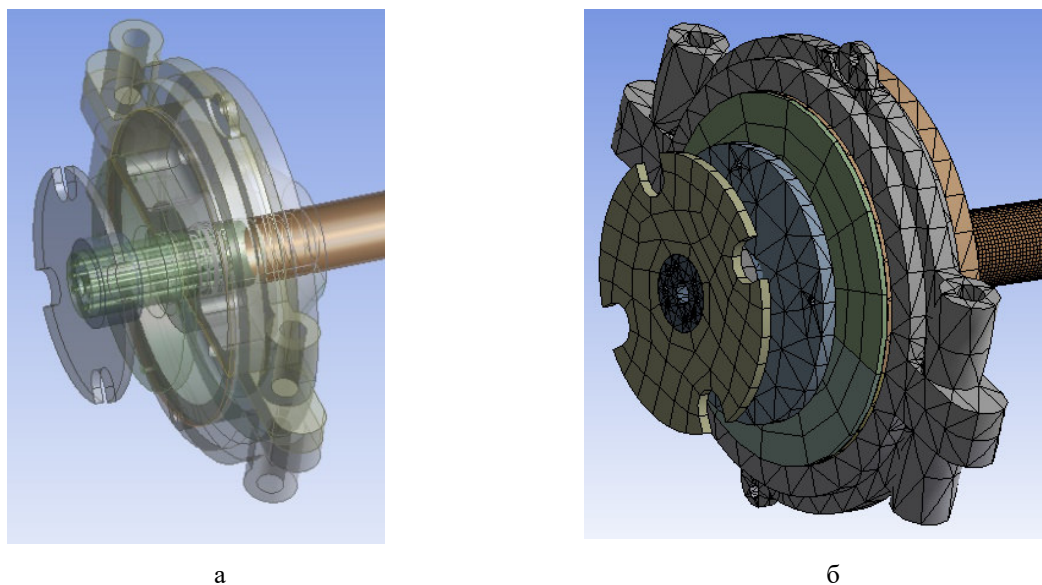


Рис. 6. Геометрическая и сеточная модели:
а) геометрическая модель; б) сеточная модель

Тепловая задача решалась в нестационарной постановке. Особенностью расчетной модели являлось использование разогретой до 150 °С трубы, все свободные поверхности рассматривались в условиях естественной конвекции с коэффициентом теплоотдачи, принимаемым из диапазона от 2 до 10 Вт/(м²·К). Из практики известно, что охлаждение полипропиленовых труб происходит достаточно быстро, в пределах 10 с. Станок для формирования раструба фактически представлен двумя рабочими зонами: в первой зоне осуществляется нагрев, затем во второй происходит пластическое деформирование. Техно-

логическое время, отводимое на передачу разогретой трубы из зоны разогрева в зону деформирования составляет 1,5 с. Поэтому ниже приводятся данные по тепловому состоянию трубы, штампов и оправки для двух моментов времени 1,5 с и 15 с. Второй момент времени выбран с учетом времени остывания полипропиленовой трубы как основного теплового источника в зоне пластического деформирования. На рисунке 7 представлены тепловые состояния деформируемого участка трубы, штампа и оправки. Анализ полученных результатов решения тепловой задачи показал: охлаждение штампа и оправки осуществляется в достаточной мере; даже за 1,5 с из-

за естественного охлаждения трубы и ее контакта с холодными металлическими штампами и оправкой происходит достаточно интенсивное остывание; падение температуры составляет

около 30 °С; интервал времени, равный 15 с приводит к существенному падению температуры нагретого участка трубы.

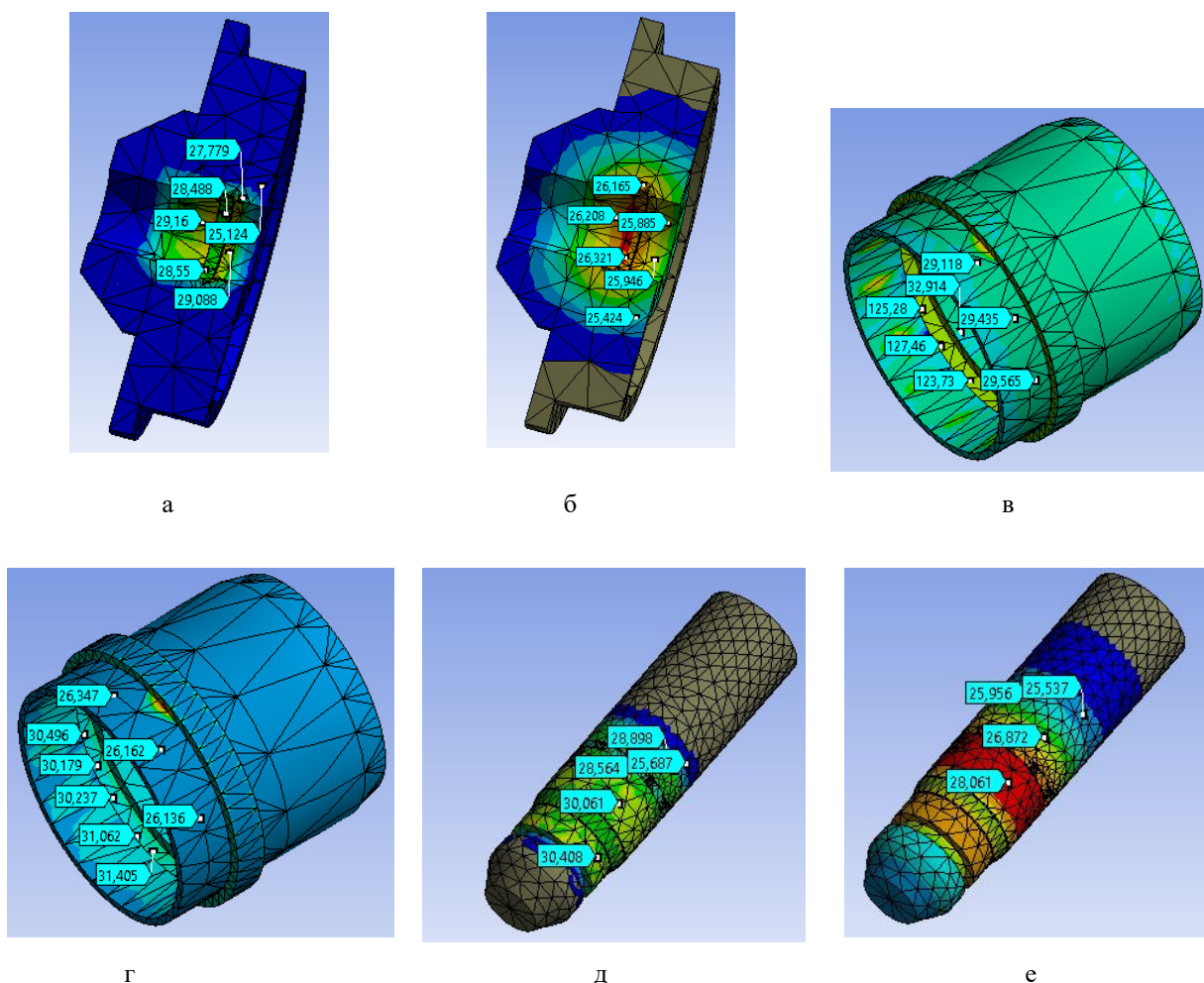


Рис. 7. Температурное состояние штампа, трубы и оправки:
а – 1,5 с; б – 15 с; в – 1,5 с; г – 15 с; д – 1,5 с; е – 15 с

Проведенные натурные испытания станка показали: необходимость в охлаждении штампа и оправки отсутствует; холодные штампы и оправка существенно затрудняют формирование буртика. Было принято решение вместо холодной воды подавать в штампы и оправку горячую воду. При этом в ходе эксперимента было установлено, что достаточным является нагрев воды до 70 °С. Проведенное компьютерное моделирование показало, что прогрев оправки и штампов до 70 °С увеличивает температуру полипропиленовой трубы в области формируемого буртика не более, чем на 8 °С. Но остывание во времени полипропиленовой трубы изменяется. Иллюстрацией этого является температурное состояние деформируемого участка полипропиленовой трубы для трех моментов времени –1,5; 5 и 15 с (рис. 8).

При выборе расчетной модели станка для моделирования этого случая теплообмена рас-

сматривались два варианта моделей. Первый вариант предусматривал заполнение полостей штампов и каналов оправки дополнительной твердотельной средой с теплофизическими характеристиками воды (материал Water liquid, содержащийся в базе данных материалов системы Ansys), для которой задавалась температура 70 °С в качестве граничных условий (не начальных). Во втором варианте тепловой модели температура 70 °С назначалась непосредственно для оправки и обоих штампов. В первой модели невозможно выполнить тепловой расчет трубы в режиме разогрева штампов и оправки до установившейся температуры 70 °С, так как контакт трубы и еще не прогретых штампов и оправки происходит сразу в первый момент времени моделирования. И сразу же начинается охлаждение деформируемого участка трубы. А с учетом быстрого остывания полипропиленовой трубы этот вариант технологически мало отличался от

предыдущего варианта формирования раструба с охлаждаемыми штампами. Поэтому на рисунке 8

приведены результаты моделирования для полностью прогретых штампов и оправки, то есть для второго варианта моделирования.

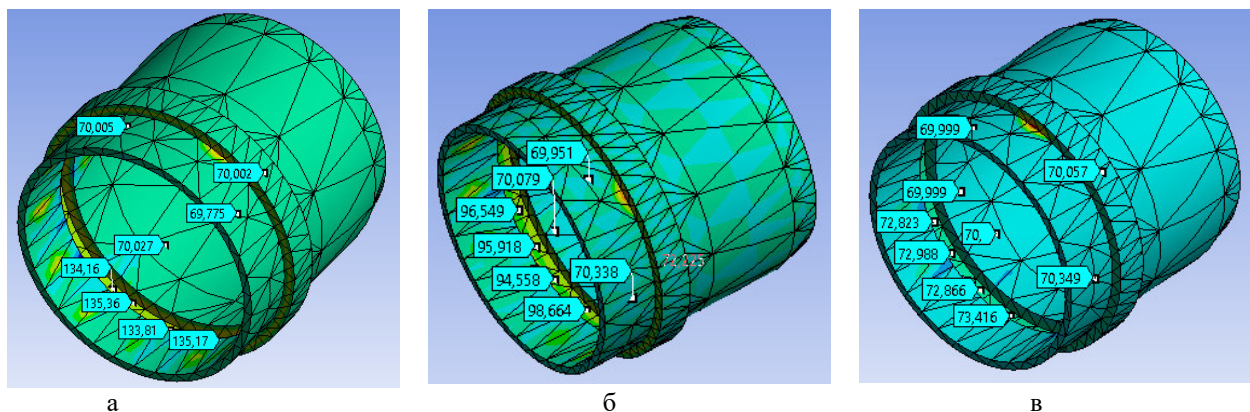


Рис. 8. Температурное состояние деформируемого участка трубы:
а – 1,5 с; б – 5 с; в – 15 с

Выводы:

1. Представлена конструкция спроектированного и впоследствии изготовленного станка для выполнения раструба для полипропиленовых труб двух диаметров.

2. Выполнено компьютерное моделирование тепловых процессов, протекающих в станке. Так как конструктивно станок представлен двумя рабочими зонами: зоной разогрева и зоной пластического деформирования, поэтому были разработаны разные тепловые модели для каждой зоны.

3. Для зоны разогрева были разработаны термоупругие модели, что обусловлено конструктивными и технологическими ограничениями станка не только по уровню температур, но и уровню теплового деформирования. Особенностью предложенных тепловых моделей в зоне разогрева является использование условной твердотельной среды с комбинированными характеристиками воздуха и деформируемого материала в упругой области.

4. В зоне пластического деформирования трубы рассмотрены тепловые модели остывания и нагревания. Особенностью использованных тепловых моделей нагревания являлось задание граничных и начальных условий в виде фиксированных значений температур. Полученные результаты моделирования были подтверждены экспериментально на изготовленном станке.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке из федерального бюджета в 2021 году гранта в форме субсидии на реализацию программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» в рамках соглашений № 075-15-2021-1171, 075-15-2021-1112.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Hametner Ch. Polypropylene pipes for drinking water supply // J Macromol Sci Part A. 1999. Vol. 36. Is. 11. Pp. 1751–1758. doi:10.1081/MA-100101625.
- Karger-Kocsis J., Barany T. Polypropylene Handbook. Morphology, Blends and Composites // Springer Nature Switzerland AG. 2019. 641 p. doi:10.1007/978-3-030-12903-3.
- Golwalkar K.R., Kumar R. Practical guidelines for the chemical industry: operation, processes, and sustainability in modern facilities // Springer Nature Switzerland AG. 2022. 297 p. doi:10.1007/978-3-030-96581-5.
- Han R., Nie M., Bai S., Wang Q. Control over crystalline form in polypropylene pipe via mandrel rotation extrusion // Polym. Bull. 2013. Vol. 70. Pp. 2083–2096. doi:10.1007/s00289-013-0963-7.
- Teoh S.H., Lee K.S., Raja, T.R. Tensile properties of flow-formed polypropylene pipe // J Mater Sci. 1991. Vol. 126. Pp. 2111–2118. doi:10.1007/BF00549176.
- An Fz., Gao Xq., Lei J. Deng C., Li Zm., Shen Kz. Vibration assisted extrusion of polypropylene // Chin J Polym Sci. 2015. Vol. 33. Pp. 688–696. doi:10.1007/s10118-015-1617-z.
- Ren Z., Huang X., Xiong Z. Experimental and numerical studies for the gas-assisted extrusion forming of polypropylene micro-tube // Int J Mater Form. 2020. Vol. 13. Pp. 235–256. doi:10.1007/s12289-019-01482-7.
- Костюков В.А., Медведев М.Ю., Маевский А.Н., Полуянович Н.К., Савченко В.В. Оптимизация форм геометрии раструба ветроэнергетической установки типа «ротор в раструбе» // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. Том 17. № 4. С. 61–68. doi:10.23947/1992-5980-2017-17-4-61-68.

9. Závadský E., Karniš J., Pechoč, V. The time, temperature and shear dependence of the viscosity of polypropylene and its influence upon the extrusion process // *Progress and Trends in Rheology. Rheol Acta*. 1982. Vol. 21. Pp. 470–474. doi:10.1007/978-3-662-12809-1_29.
10. Володин В.П. Экструзия профильных изделий из термопластов. СПб.: Профессия, 2005. 480 с.
11. SU 260108 A1. Устройство для формирования раструба / Головкин П.С. № 1150446/22-2; заявл. 10.04.1967; опубл. 22.12.1969, Бюл. № 3. 2 с.
12. SU 1255451 A1 Устройство для формирования кольцевой канавки в раструбе пластмассовой трубы / Молотков В.Н., Холодков Ю.М., Быков И.Н., Зелиско П.М. № 3723379/23-05; заявл. 10.04.1984; опубл. 07.09.1986, Бюл. № 33. 4 с.
13. SU 839709 A1 Устройство для формирования раструбов в полимерных трубах / Чирва А.В., Кауфман М.Н., Кузин А.Н., Герасимов С.Б. № 2798188/23-05; заявл. 27.06.1979; опубл. 23.06.1981, Бюл. № 23. 5 с.
14. RU 2177878 C2 Способ образования раструба на трубе / Йоханссон М., Ярвенкиля Й. № 98107159/12; заявл. 20.09.1996; опубл. 10.01.2002, 3 с.
15. SU 612809 A1. Устройство для формирования раструбов в полимерных трубах / Довбня Н.А., Кремлин Е.Д., Кац М.Х., Порошин И.И., Зуенко Н.К. № 2413951/23-05; заявл. 25.10.76; опубл. 30.06.1978, Бюл. № 24. 3 с.
16. Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г. Симуляция термомеханического поведения двусторонних торцешлифовальных станков. // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2022. № 1. С. 90–101. doi:10.34031/2071-7318-2021-7-1-90-101.
17. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
18. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.
19. Afaq M., Jebelli A., Ahmad, R. An Intelligent Thermal Management Fuzzy Logic Control System Design and Analysis Using ANSYS Fluent for a Mobile Robotic Platform in Extreme Weather Applications // *J Intell Robot Syst*. 2023. Vol.107. Is. 11. doi:10.1007/s10846-022-01799-7.
20. Skrzypczak T., Węgrzyn-Skrzypczak E., Sowa L. Numerical modeling of solidification process taking into account the effect of air gap // *Applied Mathematics and Computation*. 2018. Vol. 321. Pp. 768–779. doi:10.1016/j.amc.2017.11.023.
21. Späck-Leigsnering Y., Gjonaj E., De Gerssem H., Weiland T., Giebel M., Hinrichsen V. Electroquasistatic-Thermal Modeling and Simulation of Station Class Surge Arresters // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2016. Vol. 52, Is. 3. Pp. 1–4. doi:10.1109/TMAG.2015.2490547.
22. Sweeney-Ortiz N., Brockmann S., Kim S. Multi-objective optimization tool for shell-and-tube heat exchanger design // *In 15th UK Heat Transfer Conference*. 2017. Vol. 199.
23. Serna M., Jimenez A., A compact formulation of the bell-delaware method for heat exchanger design and optimization // *Chem. Eng. Res. Des*. 2005. Vol. 83. Is. 5. Pp. 539–550. doi:10.1205/cherd.03192.
24. Поляков А.Н. Построение и исследование оптимизационной термоупругой модели станка // *Вестник машиностроения*. 2003. № 6. С. 51–57.
25. Поляков А.Н. Компьютерные исследования тепловых деформаций металлорежущих станков. Методы, модели и алгоритмы. Оренбург: ОГУ, 2003. 382 с.

Информация об авторах

Романенко Константин Сергеевич, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: ro_k_s@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Никитина Инна Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 01.02.2023 г.

© Романенко К.С., Поляков А.Н., Никитина И.П., 2023

Romanenko K.S., Polyakov A.N., *Nikitina I.P.

Orenburg state University

*E-mail: innanikitina@list.ru

FEATURES OF THERMAL PROCESSES IN THE MACHINE FOR BELL FORMATION IN POLYPROPYLENE TUBES

Abstract. *The results of computer modeling of thermal processes in the machine for the formation of a bell in polypropylene tubes are presented. A feature of the providing machine is the presence of two working zones. In the first zone, polypropylene tubes are heated, and their plastic deforming is performed in the second zone. In each zone, individual thermal models are implemented in transient in the start. Two problems are solved in the warm up zone. The solution of the first problem allows the dumping-pouring algorithm for the warming up of the heating elements used to ensure the trendy temperature of the deformable section of the tube. The solution of the second problem made it possible to determine the emerging temperature extensions of both the heated section of the tube and the expansion of the internal and outer furnaces for two sizes of the tubes. In the plastic deformation zone, the results of computer modeling for two models are also presented. The first model considered the supply of cooling water into stamps and a mandrel. In the second model, on the contrary, the option of warming up stamps and mandrel is investigated. A feature of the proposed thermal models in the warm-up zone is the use of a conditional solid-state environment with combined air characteristics and deformable material in the elastic region. A feature of the used thermal models in the zone of plastic deformation of the tube is the task of the boundary and initial conditions in the form of fixed temperatures. The obtained modeling results are confirmed experimentally on the manufactured machine.*

Keywords: *a machine for the formation of a bell, temperature, heat models, temperature.*

REFERENCES

1. Hametner Ch. Polypropylene pipes for drinking water supply. *J Macromol Sci Part A*. 1999. Vol. 36. Is. 11. Pp. 1751–1758. doi:10.1081/MA-100101625.
2. Karger-Kocsis J., Barany T. *Polypropylene Handbook. Morphology, Blends and Composites*. Springer Nature Switzerland AG. 2019. 641 p. doi:10.1007/978-3-030-12903-3.
3. Golwalkar K.R., Kumar R. *Practical guidelines for the chemical industry: operation, processes, and sustainability in modern facilities*. Springer Nature Switzerland AG. 2022. 297 p. doi:10.1007/978-3-030-96581-5.
4. Han R., Nie M., Bai S., Wang Q. Control over crystalline form in polypropylene pipe via mandrel rotation extrusion. *Polym. Bull*. 2013. Vol. 70. Pp. 2083–2096. doi:10.1007/s00289-013-0963-7.
5. Teoh S.H., Lee K.S., Raja, T.R. Tensile properties of flow-formed polypropylene pipe. *J Mater Sci*. 1991. Vol. 126. Pp. 2111–2118. doi:10.1007/BF00549176.
6. An Fz., Gao Xq., Lei J. Deng C., Li Zm., Shen Kz. Vibration assisted extrusion of polypropylene. *Chin J Polym Sci*. 2015. Vol. 33. Pp. 688–696. doi:10.1007/s10118-015-1617-z.
7. Ren Z., Huang X., Xiong Z. Experimental and numerical studies for the gas-assisted extrusion forming of polypropylene micro-tube. *Int J Mater Form*. 2020. Vol. 13. Pp. 235–256. doi:10.1007/s12289-019-01482-7.
8. Kostyukov V.A., Medvedev M.YU., Maevskij A.N., Poluyanovich N.K., Savchenko V.V. Optimization of the shapes of the socket geometry of a wind turbine of the "rotor in the socket" type [Optimizaciya form geometrii rastruba vetroenergeticheskoy ustanovki tipa «rotor v rastrube»]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 17. No. 4. Pp. 61–68. doi:10.23947/1992-5980-2017-17-4-61-68. (rus)
9. Závadský E., Karniš J., Pechoč, V. The time, temperature and shear dependence of the viscosity of polypropylene and its influence upon the extrusion process. *Progress and Trends in Rheology. Rheol Acta*. 1982. Vol. 21. Pp. 470–474. doi:10.1007/978-3-662-12809-1_29.
10. Volodin V.P. *Extrusion of profile products from thermoplastics*. Sankt-Peterburg: Professiya. 2005, 480 p. (rus)
11. Golovkin P.S. Bell forming device. Certificate of authorship USSR, no. 260108, 1969. (rus)
12. Molotkov V.N., Holodkov YU.M., Bykov I.N., Zelisko P.M. Device for forming an annular groove in the socket of a plastic pipe. Certificate of authorship USSR, no. 1255451, 1986. (rus)
13. Chirva A.V., Kaufman M.N., Kuzin A.N., Gerasimov S.B. Device for forming sockets in polymer pipes. Certificate of authorship USSR, no. 839709, 1981. (rus)
14. Johansson M., YArvenkilya J. The method of forming a bell on a pipe. Patent RF, no. 2177878, 2002. (rus)

15. Dovbnya N.A., Kremlin E.D., Kac M.H., Poroshin I.I., Zuenko N.K. Device for forming sockets in polymer pipes. Certificate of authorship USSR, no. 612809, 1978. (rus)

16. Nikitina I.P., Polyakov A.N., Voronin D.G. Simulation of thermal deformation behavior of double-sided face grinders [Simulyaciya termodeformacionnogo povedeniya dvustoronnih torceshlifoval'nyh stankov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 90–101. doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-1-90-101. (rus)

17. Lykov A.V. Theory of thermal conductivity. Moskva: Vysshaya shkola. 1967, 600 p. (rus)

18. Miheev M.A., Miheeva I.M. Fundamentals of heat transfer. Moskva: Energiya. 1973, 320 p. (rus)

19. Afaq M., Jebelli A., Ahmad R. An Intelligent Thermal Management Fuzzy Logic Control System Design and Analysis Using ANSYS Fluent for a Mobile Robotic Platform in Extreme Weather Applications. J Intell Robot Syst. 2023. Vol.107. Is. 11. doi:10.1007/s10846-022-01799-7.

20. Skrzypczak T., Węgrzyn-Skrzypczak E., Sowa L. Numerical modeling of solidification process taking into account the effect of air gap. Applied

Mathematics and Computation. 2018. Vol. 321. Pp. 768–779. doi:10.1016/j.amc.2017.11.023.

21. Späck-Leigsnering Y., Gjonaj E., De Gersem H., Weiland T., Gießel M., Hinrichsen V. Electroquasistatic-Thermal Modeling and Simulation of Station Class Surge Arresters. IEEE Transactions on Magnetics. 2016. Vol. 52, Is. 3. Pp. 1–4. doi.org/10.1109/TMAG.2015.2490547.

22. Sweeney-Ortiz N., Brockmann S., Kim S. Multi-objective optimization tool for shell-and-tube heat exchanger design. In 15th UK Heat Transfer Conference. 2017. Vol. 199.

23. Serna M., Jimenez A. A compact formulation of the bell-delaware method for heat exchanger design and optimization. Chem. Eng. Res. Des. 2005. Vol. 83. Is. 5. Pp. 539–550. doi:10.1205/cherd.03192.

24. Polyakov A.N. Construction and study of an optimization thermoelastic model of a machine tool [Postroenie i issledovanie optimizacionnoj termoprugoj modeli stanka]. Vestnik mashinostroeniya. 2003. No. 6. Pp. 51–57. (rus)

25. Polyakov A.N. Computer research of thermal deformations of machine tools. Methods, models and algorithms. Orenburg: OSU. 2003, 382 p. (rus)

Information about the authors

Romanenko, Konstantin S. Senior lecturer. E-mail: ro_k_s@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Polyakov, Aleksandr N. DSc, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Nikitina, Inna P. PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received 01.02.2023

Для цитирования:

Романенко К.С., Поляков А.Н., Никитина И.П. Особенности протекания тепловых процессов в станке для формирования раструба в полипропиленовых трубах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 3. С. 134–144. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-134-144

For citation:

Romanenko K.S., Polyakov A.N., Nikitina I.P. Features of thermal processes in the machine for bell formation in polypropylene tubes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 3. Pp. 134–144. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-134-144