

А.Я. КАРВАЦКИЙ, Т.В. ЛАЗАРЕВ, А.Ю. ПЕДЧЕНКО
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕССА ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ УГЛЕРОДНОЙ ПРОДУКЦИИ

Проведены экспериментальные исследования процесса формования крупногабаритной углеродной продукции методом экструзии на промышленном прессовом инструменте. Определены основные технологические параметры и показатели процесса экструзии (давление, электрическая мощность нагревателей, температура в различных зонах прессового инструмента) и исследовано их циклическое изменение во время проведения кампании. Получено изменение температурного поля поверхностей и внутреннего выходного сечения заготовок во время их формования.

Ключевые слова: углеродная масса, электродные заготовки, экструзия, формование, прессование, экспериментальные исследования.

A. KARVATSKII, T. LAZARIEV, A. PEDCHENKO
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL STATE OF INDUSTRIAL PRESS FOR CARBON PRODUCTS FORMING

Carbon materials can be different depending on their physical properties and spheres of usage. Electrode and carbon products are used in aggregates of ferrous and non-ferrous metallurgy and chemical industry. High requirements are set for their mechanical and thermal hardness, electrical conductivity and chemical inertness. Pressing through the forming matrix is one of the main methods of formation of large carbon products. Carbon material is pushed to the cylinder where it is pressed. After that carbon mass goes through the forming matrix with the power 60 MN, where it is sized. Experimental research of the formation process of large carbon products in industrial pressing equipment is held. Basic technological parameters and values of extrusion process (pressure, electrical power of heaters, temperature in different areas of pressing equipment) are defined and their cyclic changes during the process are investigated. Changes in temperature field of surfaces and outlet section of carbon mass was obtained and analyzed.

Keywords: carbon mass, electrode blanks, extrusion, forming, pressing, experimental research.

Введение

Углеродные и углеродосодержащие материалы, различаются по своим физическим свойствам и областями применения. В черной и цветной металлургии, а также химической промышленности, используются электродные и углеродные изделия. К ним предъявляются высокие требования по механической и термической прочности, электропроводности, а также химической инертности. Для повышения производительности и мощности производства, используются крупногабаритные углеродные изделия.

Один из наиболее распространённых способов формования крупногабаритной углеродной продукции – прессование через формующую матрицу (мундштук) или экструзия. Углеродистая масса подается в массовой цилиндр, где уплотняется плунжером пресса, а затем усилием около 60 МН проталкивается через мундштук, тем самым заготовке придаётся соответствующий геометрической форма и размеры. Полученные заготовки являются полуфабрикатом, требующим дальнейшей высокотемпературной обработки в специализированных печах [1–3]. Будущие свойства конечного продукта закладываются еще на этапе формования, поэтому общенаучной проблемой является совершенствование процессов и оборудования для формования углеродных изделий. Нерешенной частью научной проблемы есть экспериментальное изучение теплового состояния промышленного прессового инструмента во время технологического процесса экструзии.

Целью данной статьи является представление результатов экспериментальных исследований параметров и характеристик, а также теплового состояния промышленного прессового инструмента во время кампании формования крупногабаритных углеродных заготовок.

Изложение основного материала

Прессовый инструмент, схематично представлен на рис. 1. Основными его конструктивными элементами являются массная цилиндр, плунжер и мундштук, в котором происходит процесс формования.

Массной цилиндр представляет собой теплоизолированную цилиндрическую камеру с электрическим нагревателем, расположенным по всей его поверхности. Он является неподвижной частью прессового инструмента, поэтому имеет вспомогательные системы, которые позволяют заполнять его углеродной массой [4].

Конструкция мундштука предусматривает возможность его замены и реализует две зоны деформирования: заходную и калибрующую. В заходной зоне происходит деформирования массы и переход от круглого профиля к прямоугольному, который соответствует геометрии заготовки, а в калибрующей – формируется конечный профиль изделия. Для создания необходимого уровня температуры поверхности мундштука и массы используются два основных нагревателя: в заходной и калибрующей

частях, а также четыре вспомогательных, которые расположены в углах прямоугольного выходного отверстия.

Гидравлическая система пресса развивает усилие до 62 МН, которое передается плунжером к массе. Подпрессовка проводится при 20 ± 2 МПа, а рекомендуемый диапазон самого прессования составляет 2–6 МПа.

Режим прессования и температурный режим процесса контролируется современной электронно-измерительной аппаратурой, а регулирование осуществляется автоматически и оператором.

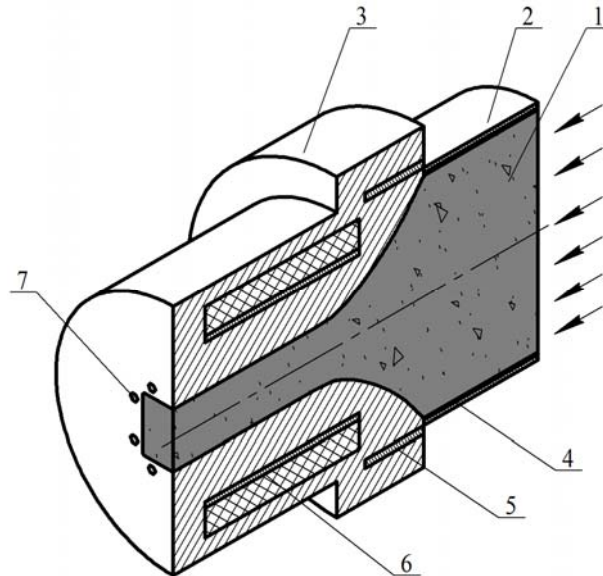


Рис. 1. Схема прессового инструмента для формования углеродной массы методом экструзии: 1 – углеродная масса; 2 – массовой цилиндр; 3 – мундштук; 4 – нагреватель массового цилиндра, 5 – нагреватель задней части мундштука; 6 – нагреватель калибрующей части мундштука; 7 – дополнительные нагреватели

Формования углеродных изделий методом экструзии состоит из следующих основных операций:

- заполнения массового цилиндра массой;
- разогрев массы до определенной температуры;
- подпрессовка;
- прессование и маркировка изделий;
- отрезка заготовки определенной длины;
- охлаждение;
- производственный контроль качества изделия.

Подпрессовка – это операция уплотнения массы при закрытом выходном отверстии мундштука запорной плитой. Во время подпрессовки достигается высокая степень уплотнения массы, что влияет на характер ее движения через мундштук, это дает возможность получать заготовки с высокой плотностью и однородностью.

Во время прессования, масса выдавливается через мундштук под действием плунжера. Ее движение характеризуется слоистой структурой: в массовом цилиндре – слои движутся параллельно друг другу, а в мундштуке – центральные несколько опережают периферийные. Такое расслоение возникает в следствие того, что материал в центре проходит меньший путь, чем периферийный, а также из-за взаимодействия стенок мундштука с массой. Кроме того, во время движения твердый наполнитель, который имеет неправильную форму гранул, переориентируется таким образом, чтобы максимальный размер частиц был обращен по направлению прессования материала. Указанные особенности приводят к образованию характерной для прессования через мундштук структуры заготовки, что отличается выраженной анизотропией свойств в перпендикулярном к оси изделия направлению [3, 5, 6].

Для получения безбраковых высококачественных углеродных изделий решающим фактором является выдержка технологического регламента, включающая поддержание определенных диапазонов температуры в различных частях прессового инструмента, величины давления и скорости прессования. Регламент прессования определяется экспериментальным путем на основании анализа возникновения бракованных изделий.

Чаще всего брак проявляется как трещины и задиры в теле заготовок. При наличии указанных дефектов в изделии, оно отбраковывается и не идет на дальнейшую термическую обработку, а измельчается и используется как составная наполнителя иной продукции, что приводит к дополнительным затратам энергетических и материальных ресурсов.

Причины, приводящие к образованию дефектов в заготовках, связаны как с составом углеродистой массы, а именно с содержанием связующего и крупностью частиц наполнителя, так и с температурным режимом прессового инструмента. Указанные факторы тесно связаны между собой и влияют друг на друга

[5, 6]. Так, при высоком содержания связующего в массе, для эффективного формирования необходимых несколько более низкие температуры прессового инструмента, из-за повышенной пластичности и вероятности деформации и искажения формы изделия. С другой стороны, перегрев или недогрев поверхности мундштука приводит к градиенту скорости в зонах контакта с массой и образованию трещин, как в продольном, так и поперечном направлениях. Поэтому бездефектное прессование основывается на балансе между реологическими свойствами композитной углеродистой массы и тепловым режимом прессового инструмента, который достигается благодаря опыту технолога и оператора производства.

Для формирования заготовок используют разные по своей рецептуре углеродные массы. Они состоят из связующего (пеки различного происхождения) и наполнителя (углеродный сыпучий материал – антрацит, кокс, термообработанное углеродное сырье и т.д.), которые смешиваются до высокой степени однородности. Рецептура, а именно содержание связующего и гранулометрический состав наполнителя, определяет технологический режим прессования [7].

Исследование физических процессов на промышленном оборудовании и в реальных условиях производства требует разработки специальной программы исследований и соответствующего измерительного оборудования. Сложности при проведенные экспериментальных исследований заключаются в необходимости выполнения измерений таким образом, чтобы минимизировать их влияние на процесс и получать максимально полную и разностороннюю картину физических явлений [8].

Для проведения экспериментальных исследований выбрана кампания прессования углеродистой массы, характеристики которой представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состав углеродной массы на экспериментальной кампании прессования

Содержание связующего, %	Наполнитель	
	Составная наполнителя	Содержание, %
27,6±2	Графитированное углеродное сырьё, фракция (0–10) мм	70
	Графитированное углеродное сырьё, фракция (0–0,05) мм	30

Для указанной углеродной массы технологический процесс проводится при технологическом регламенте, приведенном в табл. 2.

Таблица 2

Технологический регламент для экспериментальной кампании прессования

Параметр	Значение
Температура в массном цилиндре, °С	105–120
Температура в заходной части мундштука, °С	115–150
Температура в калибрующей части мундштука, °С	115–150
Давление подпрессовки, МПа	20±2
Длительность подпрессовки, мин.	3–5
Давление прессования, МПа	2–6, макс. 9
Скорость прессования, м/мин.	0,7–1,0

Штатное измерительное оборудование на прессовом инструменте включает: ваттметры для всех электрических нагревателей (погрешность измерения ±0,1 %); электронный датчик давления (погрешность измерения ±0,5–1 %); хромель-алюмелевые термопары (погрешность измерения ±1,5 °С) [9, 10]. Схема размещения штатных термопар в корпусе мундштука показана на рис. 2.

Продолжительность кампании прессования составляет более 10 суток. Она начинается с завершением подготовки необходимого количества массы, параллельно с этим происходит разогрев прессового инструмента. Далее масса загружается в массном цилиндр, подпрессовывается и формируется в заготовки – это один этап прессования. Данный цикл продолжается в зависимости от потребностей и плана производства.

Экспериментальные исследования проведены для четырех этапов в середине кампании прессования, то есть для четырех загрузок массном цилиндра. Результаты исследований можно представить в виде усредненных зависимостей измеряемых величин от безразмерного времени, отражающий полный этап прессования (рис. 3–5, серым цветом показан период прессования заготовок).

Дополнительно к сбору и анализу показателей штатного измерительного оборудования проведена серия натурных исследований теплового состояния оборудования с использованием специализированных измерительных средств. Исследования проведены с применением тепловизора Testo 875 (погрешность ±2 °С), пирометра Agema ThermoPoint 62 (погрешность ±1 °С) и контактных термометрических датчиков на основе хромель-алюмелевых термопар (погрешность ±2 °С).

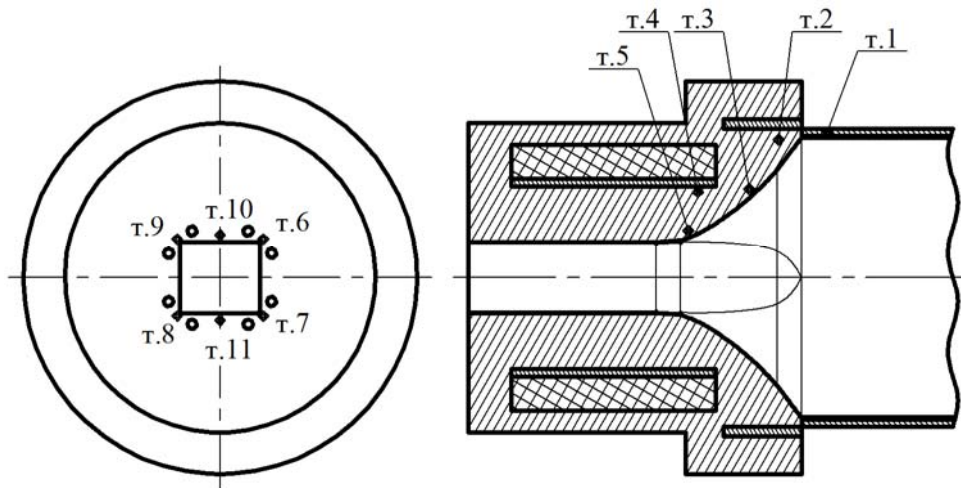


Рис. 2. Схема размещения штатных термометрических датчиков в корпусе мунштука: т.1–т.11 – нумерация штатных термометрических датчиков

Для анализа температуры массы, находящейся в массном цилиндре, исследованы температуры ее поверхности после загрузки и до начала подпрессовки. На рис. 6 представлена термограмма поверхности массы.

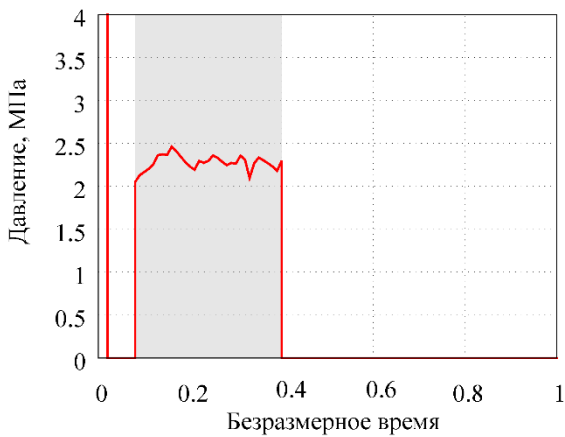


Рис. 3. Регламент этапа прессования в безразмерной форме по времени (давление прессования)

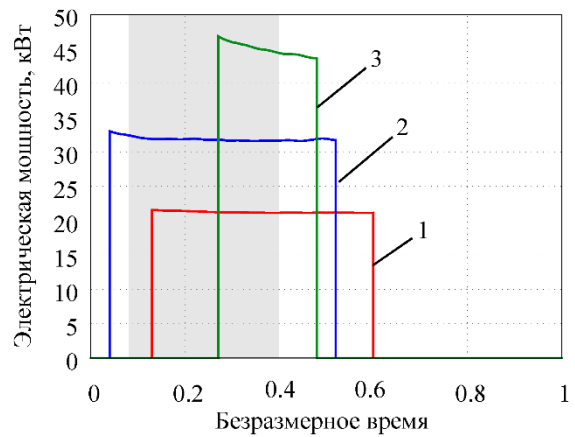


Рис. 4. Регламент этапа прессования в безразмерной форме по времени (электрическая мощность): 1 – мощность нагревателя массного цилиндра; 2 – мощность нагревателя заходной части мунштука; 3 – мощность нагревателя калибрующей части мунштука

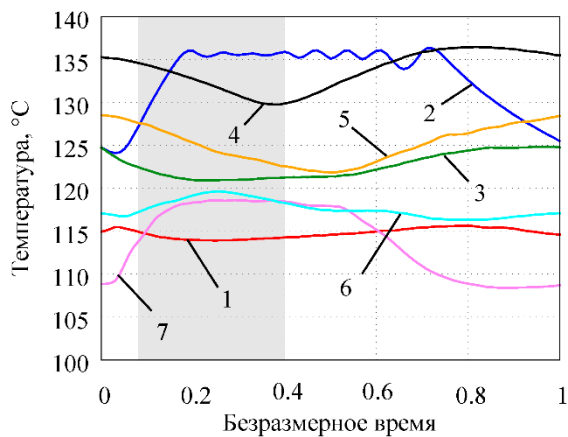


Рис. 5. Регламент этапа прессования в безразмерной форме по времени (температура штатных точек измерения): 1 – т. 1; 2 – т. 2; 3 – т. 3; 4 – т. 4; 5 – т. 5; 6 – т. 6–9; 7 – т. 10, 11

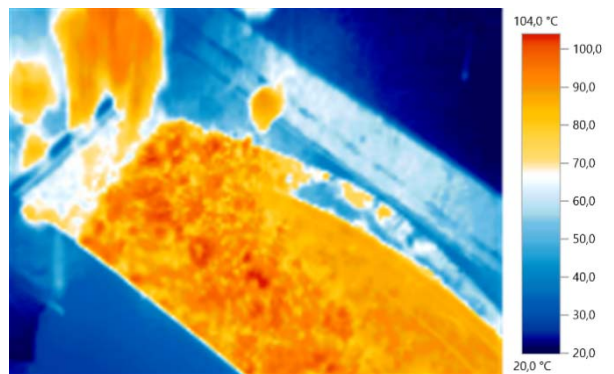


Рис. 6. Термограмма поверхности массы в массном цилиндре

Распределение температуры по поверхности материала в массном цилиндре характеризуется средним значением 91 °C и максимальным 104 °C. Указанные величины дают оценочное представление о

температуре в массном цилиндре из-за наличия интенсивного теплообмена с окружающим воздухом.

Измерение температуры внутренней поверхности массного цилиндра проведено через 40 мин после завершения этапа прессования. Температура, измеренная с помощью пирометра, представлена на рис. 7.

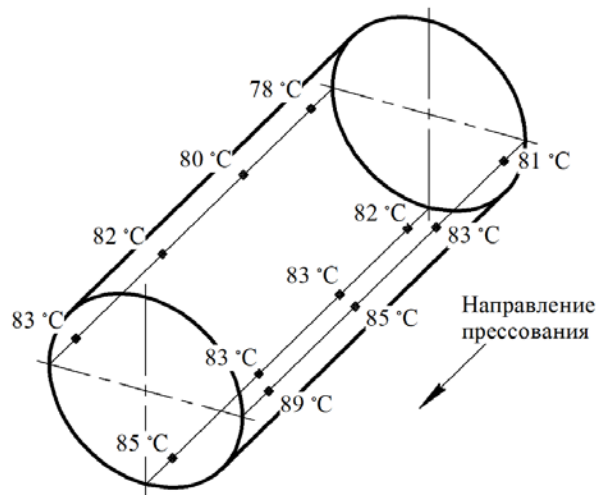


Рис. 7. Температура внутренней поверхности массного цилиндра

Определено, что при данных условиях температура меняется в среднем в диапазоне 80–86 °С от плунжера к мундштуку, соответственно. Неравномерность температуры в радиальном направлении составляет ± 2 °С.

С использованием тепловизора и пирометра по разработанной схеме измерения (рис. 8), определены температуры боковых поверхностей заготовок во время прессования. На рис. 9 показаны усредненные данные изменения температуры правой, левой и верхней поверхностей заготовок во время экструзии углеродной продукции. На рис. 10 приведена термограмма в момент прессования заготовки.

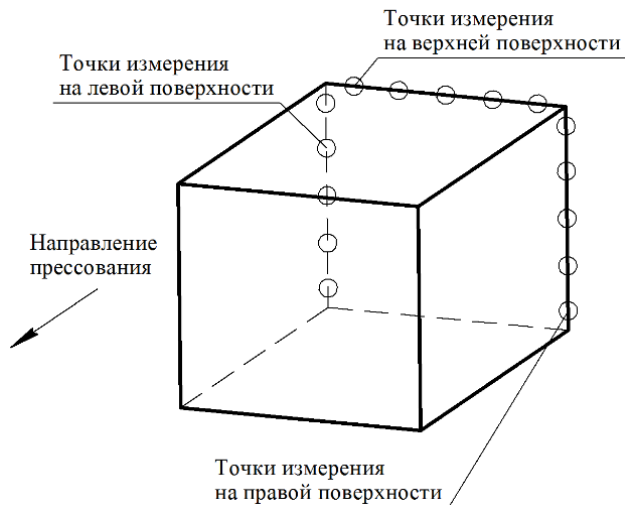


Рис. 8. Схема экспериментального определения температуры боковых поверхностей заготовки

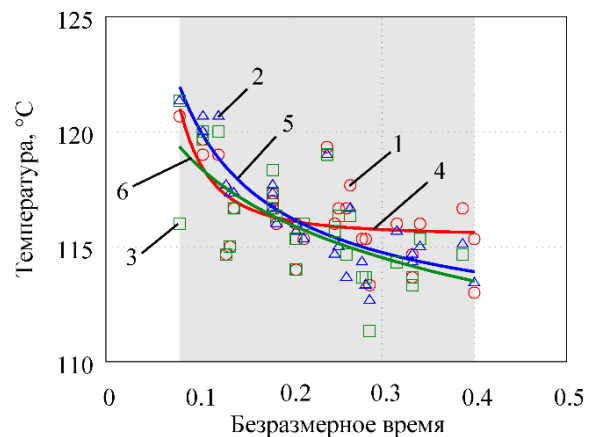


Рис. 9. Изменение осредненной температуры на поверхностях заготовок: экспериментальные значения: 1 – верхняя поверхность; 2 – левая поверхность; 3 – правая поверхность; аппроксимирующая зависимость: 4 – верхняя поверхность; 5 – левая поверхность; 6 – правая поверхность

Из представленных данных видно, что в течение этапа прессования температура боковых поверхностей заготовки снижается в диапазоне от 121 ± 2 °С до 114 ± 2 °С. При этом верх заготовки охлаждается менее интенсивно.

Для отрезания заготовок используют нож с водяным охлаждением, результат его воздействия на термическое состояние массы выражается в локальных зонах более низкой температурой в местах среза (рис. 11). Ввиду этого, для определения распределения температуры по сечению заготовки необходимо проводить измерения в точках, углубленных в массу. Для решения данной задачи разработана схема измерения, которая предусматривает быструю и одновременную установку термометрических датчиков на глубину 50 мм в тело заготовки (рис. 12, а).

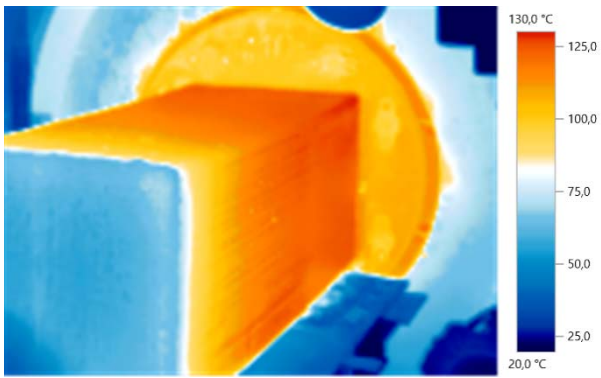


Рис. 10. Температурное поле поверхности заготовки в момент прессования

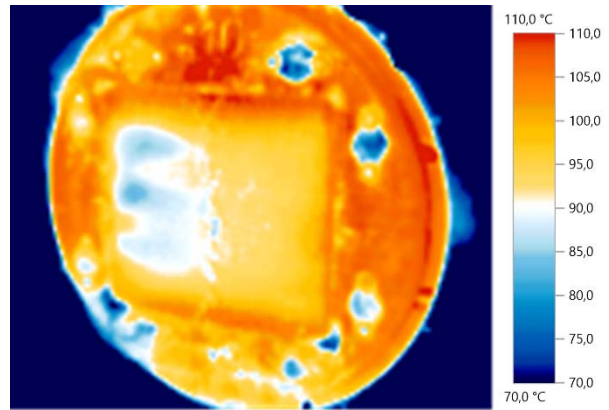


Рис. 11. Температурное поле среза заготовки

Усреднённые температурные поля выходного сечения заготовки в различные моменты прессования показаны на рис. 12, б–г.

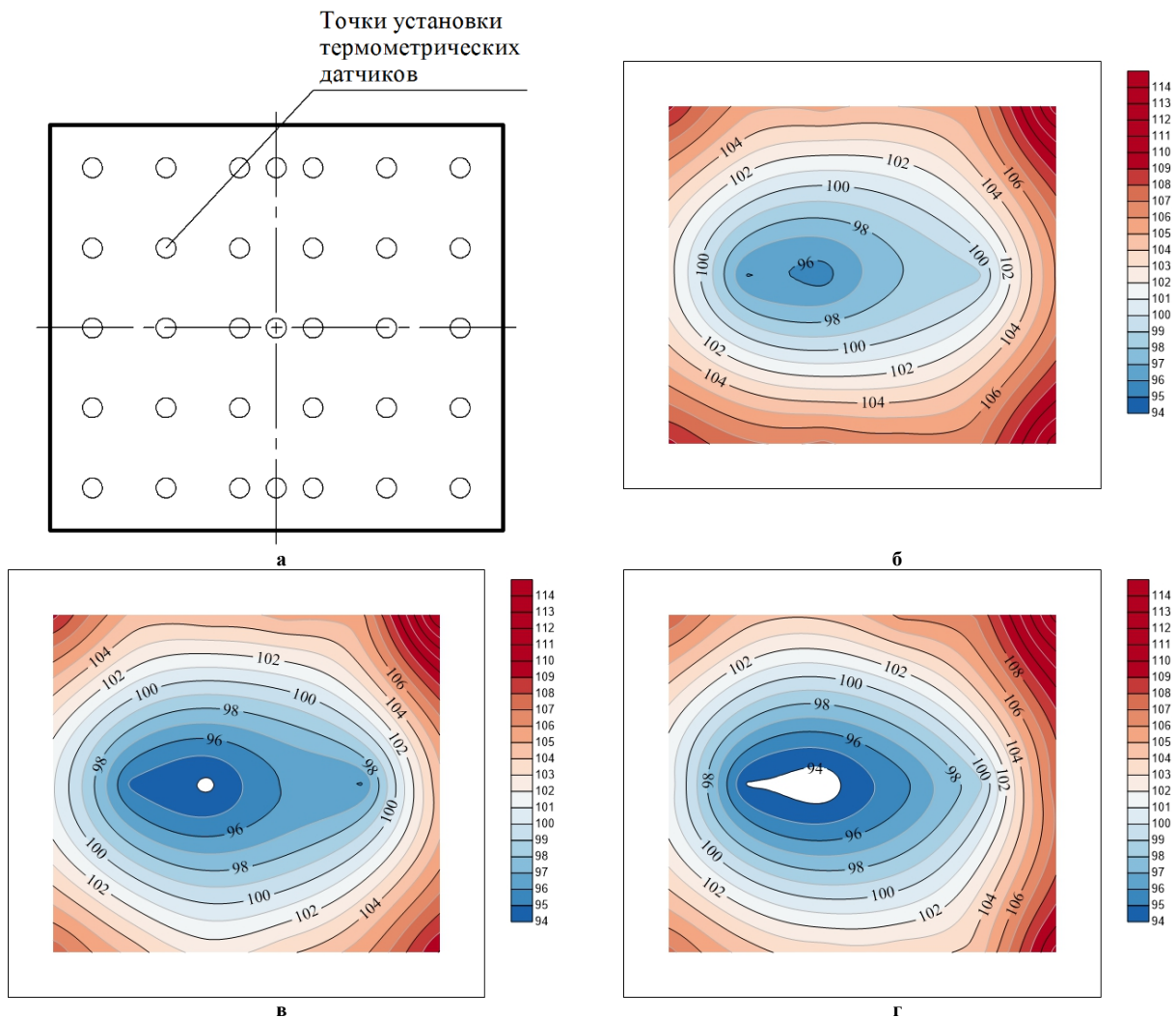


Рис. 12. Распределение температуры по выходному сечению заготовки: а – схема установки термометрических датчиков; температурное поле выходного сечения заготовки в разные моменты времени на этапе прессования: б – 0,1; в – 0,2; г – 0,4

Усредненные значения температуры центра выходного сечения заготовки представлены на рис. 13.

Полученные экспериментальные данные показывают определенную несимметричность температурного поля в выходном сечении заготовки, что может быть связано с разной интенсивностью работы дополнительных нагревателей. Однако, учитывая скоротечность процесса формования и высокое значение теплоемкости углеродистой массы ($c_p = 1750 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$) можно утверждать, что температура центра заготовки соответствует температуре массы в массном цилиндре. Таким образом, среднее значение данной температуры на этапе прессования составляет 95–99 °С.

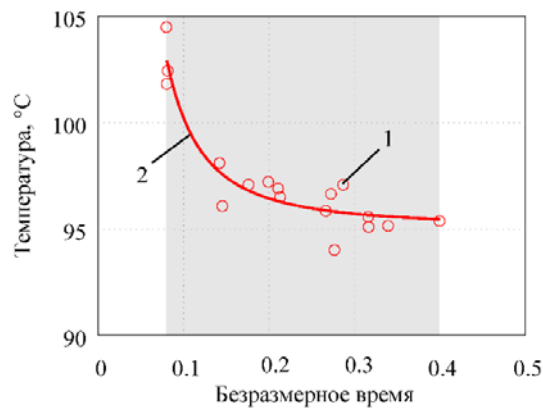


Рис. 13. Изменение во времени осредненной температуры центра заготовки:
1 – экспериментальные значения; 2 – аппроксимирующая зависимость

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований температурного состояния прессового инструмента и углеродной массы установлено, что процесс формования в промышленном прессе имеет выраженный циклический характер, который можно представить в виде зависимостей усредненных измеренных величин от безразмерного времени, отражающий полный этап прессования изделий.

Проведенные исследования распределения температуры поверхностей и внутреннего выходного сечения прессуемой массы позволяют сделать вывод, что на протяжении этапа прессования температура различных частей мундштука изменяется на уровне 5–10 °С. Соответственно, за счет теплообмена и несоответствия работы нагревателей, имеет место охлаждение углеродной массы при её формовании. Определено, что поверхности изделий охлаждаются на 9 °С (от 122 °С до 113 °С), а тело заготовки на 7 °С (от 103 °С до 96 °С). Кроме того, установлено наличие несимметричности температурного поля изделий, что связано с работой нагревателей прессового инструмента, которая проявляется в массном цилиндре и в выходном сечении заготовки.

Данные явления указывают на нерациональность выбора режима прессования и повышенную вероятность получения бракованных изделий, обуславливают необходимость проведения дальнейших исследований.

Литература

1. Sang-Min Lee Bulk graphite: materials and manufacturing process / Sang-Min Lee, Dong-Su Kang and Jea-Seung Roh // Carbon Letters. – 2015. – Vol. 16, № 3. – P. 135–146. URL: <http://dx.doi.org/10.5714/CL.2015.16.3.135>
2. Jäger H. Carbon, 4. Industrial Carbons. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry / H. Jäger, W. Frohs, M. Vanek, et. all. – Wiley, 2010. – 40 p. URL: 10.1002/14356007.n05_n03
3. Фиалков А. С. Процессы и аппараты производства порошковых углеграфитовых материалов / А. С. Фиалков. – М.: Аспект Пресс, 2008. – 687 с. – ISBN 978-5-7567-0490-7.
4. Лазарев Т. В. Математическая модель процесса экструзии вязко-пластичной углеродной массы / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 31–37.
5. Dickinson J. M. Observations concerning the determination of porosities in graphites / J.M. Dickinson, J.W. Shore // Carbon. – 1968. – Vol. 6, Iss. 6. – P. 937–941. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-6223\(68\)90077-8](http://dx.doi.org/10.1016/0008-6223(68)90077-8).
6. Bhatia G. Physical characteristics of extruded carbon mixes / G. Bhatia // Journal of Materials Science. – 1976. – № 11(7). – P. 1375–1377. URL: <http://doi.org/10.1007/BF00545165>
7. Уразлина О. Ю. Исследование физических свойств термоантрацита при высокотемпературной прокалке антрацита / О. Ю. Уразлина, М. М. Гасик, М. И. Гасик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 4. – С. 17–20.
8. Карвацкий А. Я. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів / А. Я. Карвацкий, С. М. Панов, С. В. Кутузов та ін. — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — 352 с.
9. Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production, Volume 4 / ed. by A. Tomsett, J. Johnson. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013. – 1210 p. URL: 10.1002/9781118647745
10. Панов Е. Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов / Е. Н. Панов, С. В. Лелека, М. В. Коржик // ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28–30.

Рецензія/Peer review : 7.5.2016 р. Надрукована/Printed : 7.6.2016 р.
Стаття прорецензована редакційною колегією