

УДК 621.791.927.5

Лаптев А. М.  
Ткаченко Я. Ю.**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАГРЕВОМ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ**

Наиболее распространенные в настоящее время технологии изготовления изделий из металлических и керамических порошков включают получение порошковых формовок и последующее их спекание. Формование позволяет придать порошковой массе форму, близкую к форме готового изделия, а спекание требуется для увеличения прочности механических и физических свойств формовок. Вместе с тем существуют технологии объединяющие формование и спекание в одном цикле. Эти технологии объединены общим названием «горячее прессование». Известны три основные технологии горячего прессования: горячее изостатическое прессование, горячее прессование в матрицах и динамическое горячее прессование [1]. При горячем изостатическом прессовании давление на порошок, заключенный в контейнер, передается газом или жидкостью. Динамическое горячее прессование является технологией близкой к закрытой горячей штамповке. Аналогом технологии горячего прессования в матрицах в обработке металлов давлением является изотермическая штамповка. Рассмотрим процесс горячего прессования порошковых материалов в матрицах более подробно.

Этот процесс известен давно. Еще в 1828 г. П. Г. Соболевский применил горячее прессование в матрицах для получения изделий из платины. В начале XX века его начали применять в Германии и США для получения изделий из тугоплавких соединений. С середины 20-х годов XX века этот процесс начал применяться в Германии для получения высококачественных изделий из твердых сплавов. Многочисленные исследования возможностей технологии горячего прессования в матрицах были проведены в СССР, в частности Г. В. Самсоновым и М. С. Ковальченко [2]. В настоящее время эта технология применяется для изготовления режущего инструмента из карбида вольфрама и искусственных алмазов на кобальтовой связке, изделий из бериллия, мишеней для осаждения тонких пленок, функционально градируемых изделий (FGM), а также изделий из тугоплавких металлических и керамических материалов: молибдена, оксидов, карбидов, нитридов, боридов, силицидов [3].

Для горячего прессования применяются прессы с рычажно-механическим, пневматическим и гидравлическим приводом. Порошок засыпается в пресс-форму, нагревается и нагружается усилием, создаваемым приводом прессы. Рычажно-механический привод используется для создания небольших усилий, как правило, в лабораторных установках. Для создания больших усилий применяется гидравлический привод. Для нагрева порошка при горячем прессовании используется электрический ток. Существует несколько способов нагрева, которые можно, разделить на три принципиальные группы. В первом случае тепло передается радиацией или конвекцией от нагреваемых током термозащитных элементов (рис. 1, а). Во втором случае нагрев осуществляется в результате прохождения тока через элементы оснастки и/или через порошок (рис. 1, б). В третьем случае применяется индукционный нагрев (рис. 1, в), в процессе которого нагреваемый материал помещают в переменное электромагнитное поле и нагревают циркулирующими вихревыми токами. В зависимости от электрических свойств материала пуансонов, матрицы и самого порошка во второй группе можно дополнительно выделить несколько характерных схем нагрева. Если материал пуансонов, матрицы и порошка электропроводный, то ток проходит через все эти элементы и одновременно нагревает их. В случае не электропроводности порошка ток проходит через пуансон и матрицу, образуя замкнутую электрическую цепь. При использовании матрицы как изолятора ток протекает через пуансон и порошок. Для рассмотренных схем нагрева характерны низкие напряжения и высокие токи. При обработке не электропроводного порошка и использовании изолирующей матрицы возникает необходимость их нагрева импульсным током высокого

напряжения. В этом процессе электричество, запасенное в батареи конденсаторов, в ходе разряда батареи проходит через порошок, засыпанный в изолирующую пресс-форму. При этом способе нагрева происходит пробой и повышается электропроводность порошка, что способствует его спекаемости. В процессе нагрева сопротивлением используется ток переменного, постоянного или пульсирующего характера. В последние годы все чаще поднимается вопрос об использовании пульсирующего электрического тока в процессе нагрева порошка. Считается, что данный ток способствует образованию плазмы между его частицами, тем самым ускоряя процесс спекания [4].

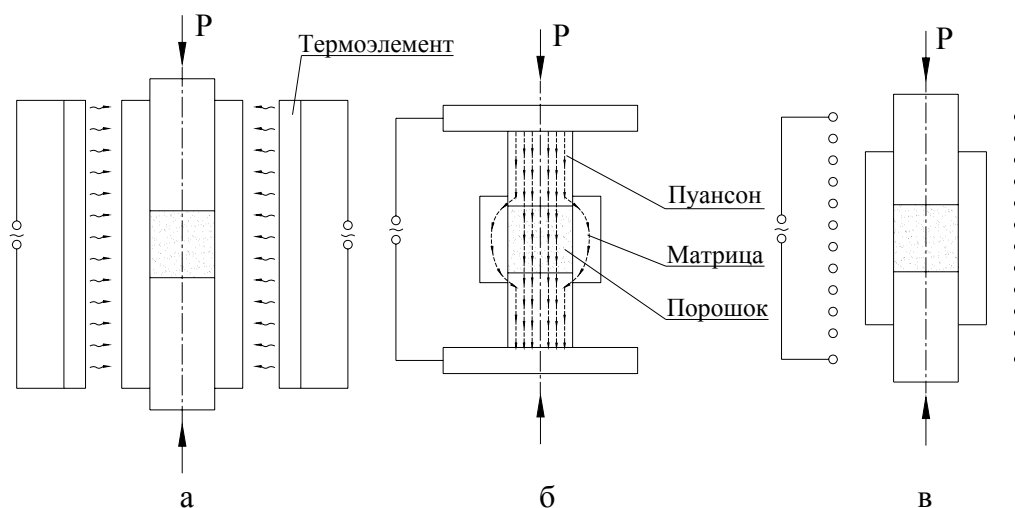


Рис. 1. Схемы нагрева порошка электрическим током при горячем прессовании: а – нагрев радиацией; б – нагрев сопротивлением; в – индукционный нагрев

Подача электрического тока в процессе горячего прессования порошка с нагревом пульсирующим электрическим током осуществляется в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Электроэнергия проходит через специально разработанный источник электрического тока, который обеспечивает контроль формы, частоты и величины подачи импульсов тока. Ток проходит через инструмент и заготовку, обеспечивая быстрый нагрев порошкового материала. Данная схема прессования обеспечивает однородный и быстрый нагрев, по сравнению с радиационным нагревом при горячем прессовании.

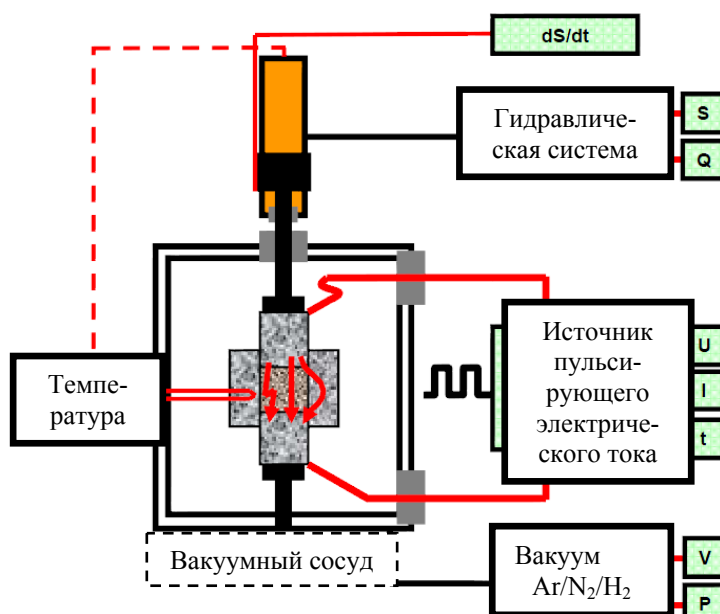


Рис. 2. Схема оборудования для горячего прессования пульсирующим электрическим током

Также преимуществом рассматриваемой технологии спекания является то, что нагрев границ зерен материала имеет точечный характер (рис. 3), что способствует минимизации роста зерна и улучшению механических, физических и оптических свойств, и устранению необходимости спекания примесей.

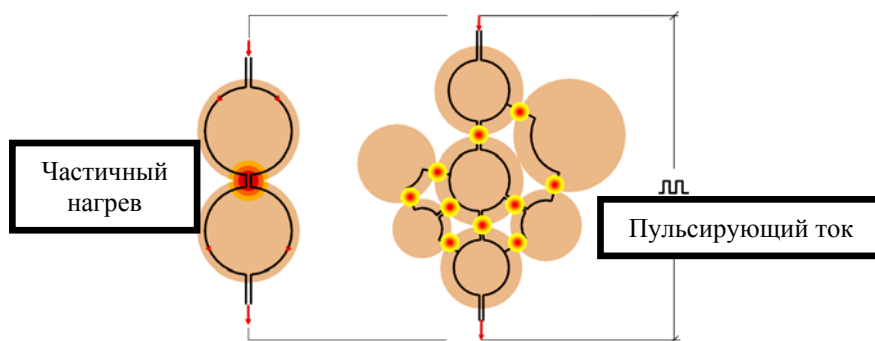


Рис. 3. Сосредоточение энергии на микроскопических границах

Необходимо отметить, что можно регулировать форму, мощность и частоту импульса подаваемого электрической установкой тока. Подача электрического тока может осуществляться не постоянно, а с требуемыми по технологии паузами или в соответствии с заданным циклом подачи (рис. 4).

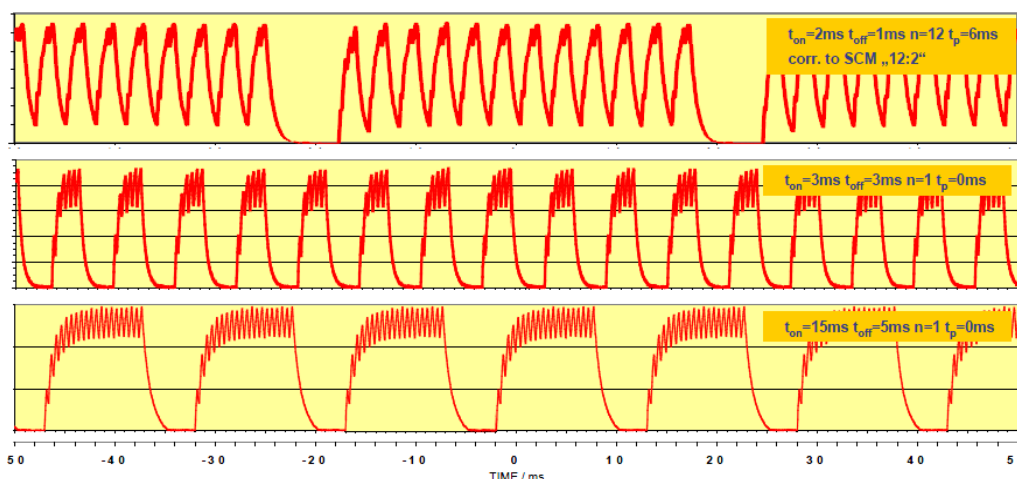


Рис. 4. Диаграмма эластичности входящего пульсирующего электрического тока: продолжительность импульса  $t_{on} = 1 \dots 255$  мс; продолжительность паузы  $t_{off} = 0 \dots 255$  мс; количество импульсов  $n = 1 \dots 255$ ; дополнительная пауза  $t_p = 0 \dots 255$  мс

В процессе нагрева оснастка и порошок плотно взаимодействуют между собой, вызывая при этом активные окислительные реакции. Для их предотвращения процесс горячего прессования проводят в защитных атмосферах, используя вакуум либо инертные газы.

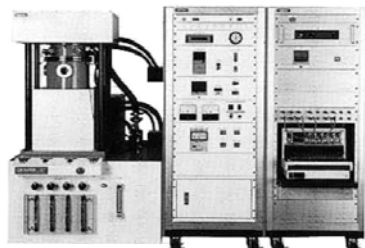
С использованием нового способа нагрева порошка возникла необходимость в разработке подходящего для данного процесса оборудования и оснастки.

Целью статьи является изучение оборудования и оснастки, используемых для процесса горячего прессования порошковых материалов с нагревом пульсирующим электрическим током.

Оборудование. В настоящее время основными производителями оборудования для горячего прессования с прямым нагревом электрическим током являются компании SPS SYSTEX INC. (Япония) и FCT Systeme GmbH (Германия). Рассмотрим более подробно каждую из компаний.

FCT Systeme GmbH (Германия) выпускает оборудование серии DR. SINTER (The DR. SINTER Spark Plasma Sintering Systems), в состав которого входят модели, предназначенные

для научных исследований, обучения и использования в производстве. Классификация выпускаемой продукции и технологические особенности представлены на рис. 5 и табл. 1, соответственно.



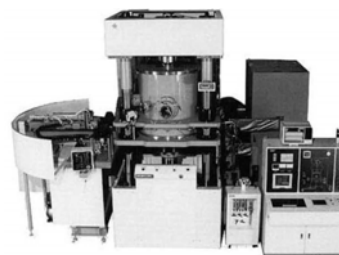
Серия компактных машин для лабораторных исследований (Dr. Sinter Lab™): SPS-511S/515S



Серия стандартных машин для исследований: SPS-1020/1030/1050/1080 и SPS-2040/2050/2080



Серия стандартных машин для исследований и производства: SPS-3.20/5.40/7.40/9.20



Серия роботизированных машин для производства (Dr. Sinter™ Robo): SPS-9.40

Серия машин с контролируемой атмосферой для исследования новых материалов: SPS-5.11ET



Рис. 5. Машины компании SPS Systex Inc. (Япония) для горячего прессования с нагревом пульсирующим током

Данная серия используется во многих университетах, технических школах и исследовательских центрах по всему миру. Оборудование для производства оснащено различными устройствами безопасности, которые обеспечивают высокий уровень надежности. Оборудование, оснащенное автоматическим роботом и компьютером, позволяет проводить полностью и полу автоматизированную обработку материалов. Автоматическая линия предусматривает полную автоматизацию процесса от загрузки порошка, его нагрева, охлаждения и до получения готовой продукции в штампе.

Компания FCT Systeme GmbH (Германия) занимается разработкой нового поколения вакуумных горячих прессов (табл. 2), использующих современную технологию SPS / FAST (Spark plasma sintering / The field assisted sintering technique), и гарантирующих эффективное и надежное использование преимуществ названных технологий. При данном методе спекания инструмент или деталь нагревается за счёт проходящего через них тока, так что продолжительность цикла может составлять несколько минут. Подача коротких импульсов постоянного тока вызывает у многих материалов дополнительное повышение активности спекания вследствие процессов, проходящих в точках соприкосновения частиц порошка (Джоулевый нагрев, образование плазмы, электромиграция и т. д.), что позволяет работать с более низкими температурами и/или усилиями прессования, чем при традиционном горячем прессовании или спекании.

Таблица 1

Технические характеристики оборудования компании SPS Systex Inc. (Япония)

Модель	Максимальное усилие, кН	Максимальная температура, °С	Ход, мм	Максимальный ток, кА	Габариты, мм	Вес, т
SPS-511S	50	2000	150	1,0	900 × 1050 × 1575	0,8
SPS-515S				1,5		
SPS-1020	100	1300*	150	2,0	1350 × 1615 × 1800	2,2
SPS-1030				3,0		
SPS-1050				5,0		
SPS-1080				8,0		
SPS-2040	200		150	4,0	1350 × 1615 × 1800	2,2
SPS-2050				5,0		
SPS-2080				8,0		
SPS-3.20МК-II	200	1300*	250	4,0	900 × 1050 × 2368	2,2
SPS-3.20МК-IV				8,0		
SPS-5.40МК-IV	500		300	8,0	1200 × 1350 × 2670	6,0
SPS-5.40МК-VI			350	15,0	2200 × 1400 × 2900	8,0
SPS-7.40МК-V	1000		300	10,0	1350 × 1300 × 2670	6,5
SPS-9.40МК-VII	3000		350	20,0	1650 × 1640 × 3500	15,0

\* Температура может быть увеличена до 1700 °С и 2700 °С.

\*\* Температура может быть увеличена до 2700 °С.

Таблица 2

Технические характеристики оборудования компании FCT Systeme GmbH (Германия)

Модель	Размер матрицы	Размер образца	Макс. усилие, кН	Макс. напряжение, В	Макс. ток, кА	Потребляемая мощность, кВт	Вид установки
HP D 5	Ø 60 × 180	Ø 30	50	7,2	5,5	45	стационарная
HP D 25	Ø 200 × 300	Ø 80	250	8,0	8,0	78	
HP D 125	Ø 350 × 300	Ø 150	1250	8,0	24,0	212	
HP D 250	Ø 400 × 450	Ø 300	2500	8,0	48,0	408	
HNP D 25	Ø 200 × 200	Ø 80	250		100 кВт*	115	гибридная
HNP D 400	Ø 500 × 300	Ø 400	4000		1000 кВт*	1200	

\* Максимальная мощность нагревательных устройств гибридной установки.

Результатом использования разработанных машин являются возможность производства разнообразных материалов с уникальными свойствами, например: изготовление наноматериалов спеканием без характерного роста зерна, FGM («Functionally Graded Materials» – функционально классифицированные материалы); композиционных материалов; твердых сплавов; алюминиевых и медных сплавов, а также интерметаллические соединения; структурной и функциональной керамики.

Как пример рассмотрим установку HP D/250C (рис. 6) выпускаемой данной компанией. Она оснащена гидравлической системой с полностью цифровым управлением и точным регулированием скорости/усилия через оптический датчик хода. Вакуумный резервуар с двойными стенками и водяным охлаждением позволяет создавать любую атмосферу для спекания (как статичную, так и подвижную) с регулируемым давлением газа. Свободно программируемые импульсы постоянного тока, выдаваемые блоком питания, позволяют гибко адаптироваться к любым поставленным задачам. Температура спекания может достигать

2400 °С и контролируется пятью термоэлементами и дополнительно двумя пирометрами. Все технологические параметры задаются в виде программы. Информация о процессе отображается в цифровом формате и обрабатывается встроенным регистратором данных. Концепция установки не содержит ограничений в отношении входных параметров процесса, т. е. для каждой задачи может быть найдено специальное решение. Используемый в установке процессор способствует удобству управления.



Рис. 6. Установка HP D/250C компании FCT Systeme GmbH (Германия)

Остальные модели установок отличаются от описанной выше тем, что они предназначены для других размеров изготавливаемых деталей, а также в некоторых из них используется так называемый гибридный нагрев. Гибридная установка отличается от обычной тем, что нагрев заготовки происходит при помощи одной или нескольких дополнительных нагревательных систем.

Оснастка (рис. 7). Горячее прессование керамических порошков, как правило, осуществляется при температурах выше 1400 °С. Поэтому в качестве материала для изготовления инструмента чаще всего применяется высокоплотный конструкционный графит, который сохраняет прочность даже при температуре 2000 °С [1]. Необходимо отметить, что с ростом температуры пластичность графита непрерывно увеличивается, а опасность хрупкого разрушения соответственно уменьшается, графит легко обрабатывать на металлорежущих станках и слесарно-механическим способом, а также он имеет достаточно высокие тепло- и электропроводность для использования в прессах горячего прессования как с косвенным, так и с прямым нагревом пресс-формы.

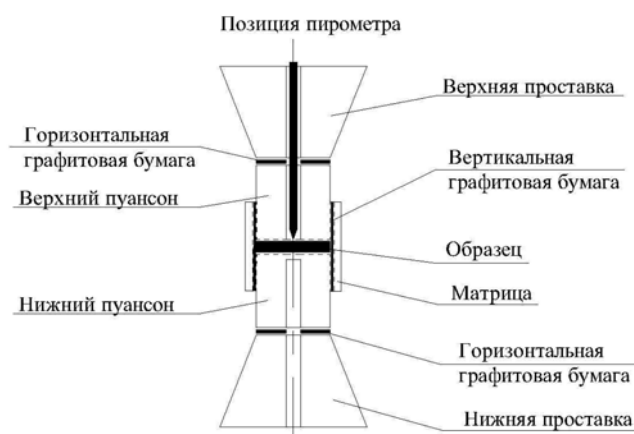


Рис. 7. Схема оснастки для горячего прессования с прямым нагревом электрическим током

Однако графит имеет ряд значительных недостатков, которые пагубно влияют на развитие горячего прессования. Графит имеет пористую структуру, поэтому при горячем прессовании наблюдается затекание прессуемого материала в поры, что способствует запрессовке, затруднению извлечения готового изделия и уменьшению долговечности пресс-формы.

Также графит имеет пониженную и нестабильную прочность в условиях действия растягивающих напряжений в пресс-форме, характеризуется сильной анизотропией механических свойств в пределах одной заготовки.

В связи с перечисленными выше факторами практикуется использование других материалов для пресс-форм. Если температура горячего прессования ниже 1400 °С, то для изготовления оснастки возможно применение сплава TZM на основе молибдена, с увеличением давления прессования до 250 МПа. При дальнейшем повышении температуры начинается рекристаллизация и охрупчивание этого сплава [5]. Применение сплавов на основе никеля типа IN-100 возможно до температуры примерно 1000 °С. Более дешевый никелевый сплав Inconel-718 можно применять при температурах прессования до 760 °С [6], жаропрочные стали, разработанные для горячей штамповки и твердые сплавы, применяются при температурах прессования до 400–450 °С [7, 8]. Реже используют оснастку из корунда, карбида кремния, а также боридов и карбидов переходных металлов, поскольку эти материалы трудно обрабатывать, они обладают низкой термостойкостью и могут реагировать с прессуемыми порошками [9]. Для предотвращения взаимодействия прессуемого материала и материала штампа внутреннюю поверхность последнего иногда покрывают какими-либо инертными составами (жидким стеклом, эмалью, нитридом бора) [1]. Но чаще всего, для уменьшения электрического и термического сопротивления, предохранения поверхности графитового штампа и облегчения удаления прессовки, между прессуемым материалом с одной стороны и пуансоном и матрицы с другой стороны, помещают тонкую графитовую фольгу. Для предохранения графитовой оснастки от выгорания, а прессуемого материала от взаимодействия с воздухом горячее прессование обычно осуществляют в вакууме или в защитной атмосфере [4].

## ВЫВОДЫ

Технологические особенности процесса спекания порошков пульсирующим электрическим током, такие как короткая продолжительность обработки, использование их температур, являются основными преимуществами технологии спекания. При этом минимизируется рост зерна, который часто ведет к улучшению механических, физических или оптических свойств, и устранение необходимости спекания примесей. Таким образом, на данный момент одной из актуальных тем по всему миру является разработка способов и оборудования для горячего прессования порошковых материалов с нагревом пульсирующим электрическим током.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Процессы порошковой металлургии. В 2-х т. Т. 2. Формование и спекание* / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М.: МИСИС, 2002. – 320 с.
2. Самсонов Г. В. *Горячее прессование* / Г. В. Самсонов, М. С. Ковальченко. – Киев: Гостехиздат УССР, 1962. – 212 с.
3. Кипарисов С. С. *Оборудование предприятий порошковой металлургии* / С. С. Кипарисов, О. В. Падалко. – М.: Металлургия, 1988. – 448 с.
4. Grasso S. *Electric current activated/assisted sintering (ECAS): a review of patents 1906–2008* / S. Grasso, Y. Sakka, G. Maizza // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2009. – Vol. 10. – P. 1–24.
5. *Molybdenum, Plansee, Reutte*. – 2007. – 32 p.
6. *Metals Handbook, 9-th Edition, vol. 14 // Forming and Forging*. – Metals Park, Ohio, 1976.
7. *Metals Handbook, 9-th Edition, vol. 7 // Powder Metallurgy*. – Metals Park, Ohio, 1976.
8. *Characterization of hot pressed rapidly solidified melt-spun multi-component Al-Ni-Fe-X flakes* // K. Y. Sastry, L. Froyen, J. Vleugels, O. Van der Biest, R. Schattevoy, K. Hummert // *Proceedings of Powder Metallurgy World Congress & Exhibition (Vienna, Austria, 17-21 October 2004)*. – Vol. 1. – P. 443–448.
9. Ковальченко М. С. *Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением* / М. С. Ковальченко. – К.: Наукова думка, 1980. – 240 с.

Лаптев А. М. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТиТОМ ДГМА;  
Ткаченко Я. Ю. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: tkachenko1110@mail.ru