

Литература

1. Кухарев, Б.С. Диффузионные цинковые слои: получение, структура и свойства / Б.С. Кухарев, Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович. – Металловедение и термическая обработка металлов. – 2000. – № 7. – С. 6–10.

УДК 621.793

К.Е. БЕЛЯВИН, д-р техн. наук (БНТУ),
М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук,
И.А. СОСНОВСКИЙ (ОИМ НАН Беларуси)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СПЛАВОВ

Введение. Нанесение покрытий из ферромагнитных сплавов [1] с использованием индукционного нагрева предполагает учет физических свойств используемых материалов. При индукционном нагреве материалы, обладающие ферромагнитными свойствами, в отличие от парамагнитных материалов, нагреваются значительно интенсивнее. В настоящей работе рассмотрен процесс формирования покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов на железной основе в поле центробежных сил.

Технология получения покрытий. Нанесение покрытий из порошков ферромагнитных материалов на внутренние поверхности быстроизнашивающихся деталей осуществляется следующим образом. Деталь устанавливают в центрирующую оправку и закрепляют зажимным приспособлением с упругим поджимом. Затем деталь приводят во вращение, а устройство перемещают на позицию нагрева до полного вхождения внутреннего индуктора ТВЧ в полость детали и предварительно нагревают до температуры, которую определяют из соотношения:

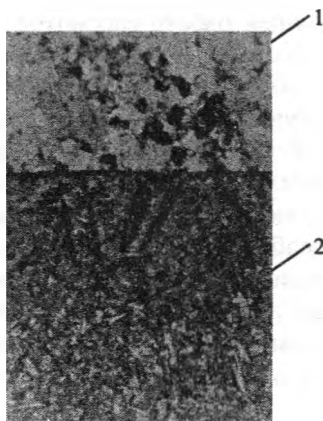
$$T \geq K \left(T_{\kappa} + \frac{m_1 c_1}{mc} (T_{\kappa} - T_0) \right),$$

где: T_k – температура Кюри для порошка, К; m_1 – масса материала покрытия, кг; m – масса детали, кг; c – удельная теплоемкость материала детали, Дж/(кг·град); c_1 – удельная теплоемкость порошка Дж/(кг·град); T_0 – начальная температура порошка, К; $K = 1,1-1,2$ – коэффициент запаса, учитывающий потери теплоты в окружающую среду, устанавливаемый экспериментально.

Далее нагрев ТВЧ прекращают и осуществляют загрузку мерной дозы порошка в полость детали при ее вращении. При этом посредством теплопередачи от детали порошковый слой нагревается выше температуры Кюри, теряет свои ферромагнитные свойства и переходит в парамагнитное состояние. Затем деталь снова перемещают на позицию нагрева, где предварительно сформованный порошковый слой спекается и расплавляется на внутренней поверхности детали.

По окончании процесса нанесения покрытия отключают нагрев и привод вращения детали, извлекают деталь из устройства и обрабатывают покрытие.

Металлографические исследования покрытий. Микроструктура наплавленного покрытия ($T = 1420$ К) из порошка самофлюсующегося сплава на железной основе ПР-Х4Г2Р4С2Ф показана на рисунке 1.



1 – основной материал колеса; 2 – материал покрытия

Рисунок 1 – Микроструктура переходной зоны покрытие – основа, $\times 300$

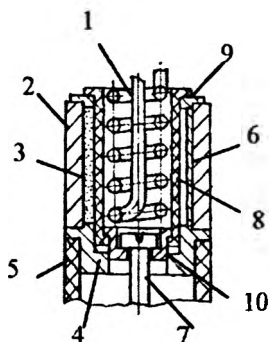
Из рисунка очевидно, что покрытие качественное, плотное, при этом имеется четкая граница сплавления покрытия с основой шириной 20–50 мкм. Вблизи границы сплавления встречаются довольно крупные дендритные образования бороцементита и веерообразной эвтектики. По мере удаления от границы сплавления к середине наплавленного слоя крупные выделения исчезают, имеет место мелкодисперсная структура с четко видимыми выделениями карбоборидов разных форм и размеров. Далее, ближе к внешнему краю покрытия, структура не изменяется и остается мелкодисперсной. Микротвердость матрицы покрытия соответствует 6130–6570 МПа, железо-хромистых соединений – 6570–7240 МПа, боридов – 9740–10600 МПа и эвтектики – 7240 МПа. Прочность сцепления покрытия с основой составляет 250–280 МПа.

Высокая твердость и износостойкость покрытия с указанной структурой определяется наличием твердого раствора на основе α -Fe с карбидными (Me_3C) и боридными (Me_2B) выделениями различных форм и размеров, а также эвтектики типа $Me (Si, B)$.

Исследования показали, что уменьшение температуры нанесения покрытия до 1300–1200 К нежелательно, так как приводит к образованию спеченной пористой структуры у покрытия и значительному (15–25 %) снижению его прочности сцепления с основой детали. Напротив, увеличение температуры до 1500 К и выше недопустимо вследствие возможного перегрева материала детали и образования грубой структуры у покрытия. Поэтому для получения высоконадежных покрытий температура наплавки порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф должна находиться в пределах 1370–1450 К.

Способы и устройства для получения покрытий из ферромагнитных материалов. Для нанесения покрытий с использованием внутреннего нагрева можно использовать шпиндельное устройство [2] с упругим винтовым поджимом с наладкой, показанной на рисунке 2.

В наладке в качестве формирующего стержня используется керамическая втулка, которая обеспечивает нагрев размещенного в зазоре закрытой формы порошка из ферромагнитных сплавов.

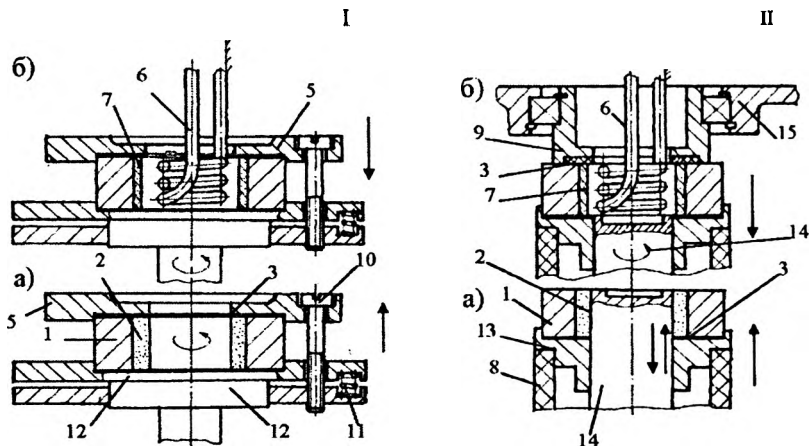


1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – порошковая засыпка; 4 – оправка с центральным стержнем; 5 – керамическая труба шпинделя; 6 – покрытие; 7 – винт; 8 – керамическая втулка; 9 – шайба; 10 – колпачок

Рисунок 2 – Наладка для внутреннего нагрева, предназначенная для работы со шпинделем, оснащенный упругим поджимом

Однако, внутренний нагрев в закрытой форме (рисунок 2) весьма непроизводителен, так как эффективный зазор между индуктором и ферромагнитной деталью увеличивается не только на толщину порошковой засыпки слоя, но и на толщину формирующей керамической трубки. Поэтому, чтобы максимально приблизить поверхность индуктора к поверхности нагреваемой основы и порошка и повысить КПД нагрева, внутренний нагрев при вертикальном формовании целесообразно осуществлять в открытых формах, исключая необходимость присутствия формирующих элементов в момент нагрева. Наиболее подходящим для вертикальной технологической схемы центробежного индукционного нанесения покрытий является применение удаляемого формирующего элемента перед осуществлением операции нагрева (рисунок 3). Удаляемый элемент должен сначала обеспечить возможность засыпки порошка в зазор и тем самым равномерно распределить его по внутренней поверхности заготовки в статическом состоянии шпиндельного устройства и только затем, придав форме вращения (для того, чтобы уберечь сформованный слой от разрушения), его можно извлекать из вращающейся с формой детали. Для установок и шпиндельных устройств простейшего исполнения (схема I рисунка 3 и рисунок 4)

оно может быть выполнено в виде отдельного от шпиндельного устройства вспомогательного стержня (рисунок 5 а, б) и в виде специальных (схема II рисунка 3) встроенных в шпиндель стержней, установленных с возможностью вертикальных перемещений.



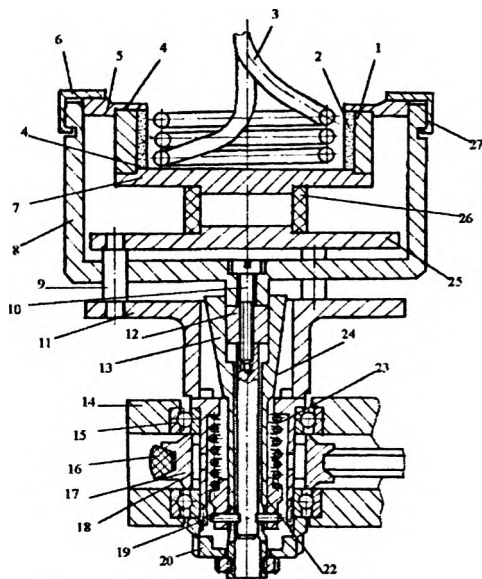
1 – заготовка; 2 – порошковая засыпка; 3 – прокладка; 4 – центрирующая оправка с формующим стержнем; 5 – крышка; 6 – индуктор; 7 – покрытие; 8 – шпиндель; 9 – вращаемый упор; 10 – винт крепления заготовки; 11 – упругий элемент; 12 – шпиндель; 13 – полая центрирующая оправка; 14 – перемещаемый формующий стержень; 15 – корпус вращаемого упора; исходная (а) и конечная (б) позиции (\rightleftharpoons , \curvearrowright) – кинематика движений

Рисунок 3 – Принципиальные схемы исполнения устройств с вертикальным расположением оси вращения, обеспечением внутреннего нагрева, с использованием обычной открытой формы (I) и открытой формы с удаляемым стержнем (II)

Устройство для формирования порошковых слоев с использованием извлекаемого стержня во время вращения представлено на рисунке 4.

Аналогичный способ формирования реализуется в специальных устройствах по нанесению покрытий, в которых формующий стержень встраивается в шпиндель (схема II рисунка 3 а, б). Обычно в установках этого типа предусматривается позиция (схема II рисунка 3) засыпки порошка между заготовкой 1 и выдвинутым стержнем 14 в статическом состоянии шпинделя, промежуточная позиция (на

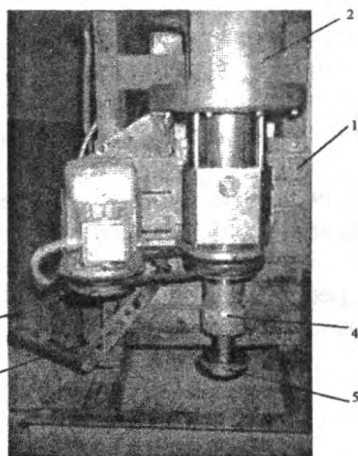
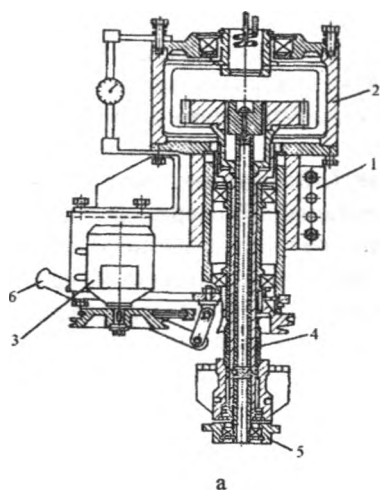
схеме II рисунка 3 не показана) поджима детали 1 к полюсу корпуса вращаемого упора 9, на которой также обеспечивается вращение и удаление формирующего стержня 14 из внутренней полости детали 1 для размещения в освободившемся внутреннем объеме индуктора, а также (схема II рисунка 3 б) – позиция нагрева, на которой индуктор 6 для внутреннего нагрева вводится через полый корпус вращаемого упора 15 при вертикальном перемещении с предыдущей позиции.



1 – деталь; 2 – порошок; 3 – индуктор; 4 – прокладки; 5, 6, 8, 10, 12, 19, 22, 23 – детали упругого поджима; 14 – корпус; 7, 9, 11, 13, 15, 20, 21, 24, 25, 26, 27 – детали узла вращения; 16, 17, 18 – детали привода

Рисунок 4 – Шпиндельное устройство для осуществления центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий с внутренним нагревом и вертикальным расположением оси вращения

Подробное описание конструкции устройства для формирования покрытий засыпкой порошка в зазор со встроенным и удаляемым во время вращения стержнем, выполненным по схеме II рисунка 3 а, б, приведено в работах [2, 3]. Конструктивная схема установки представлена на рисунке 5 а, ее общий вид – на рисунке 5 б.



1 – станина; 2 – корпус шпиндельного устройства; 3 – привод вращения шпинделя; 4 – винтовой привод перемещения штока стержня; 5 – шток стержня; 6 – рычаг привода вертикального перемещения шпинделя
 Рисунок 5 – Конструктивная схема (а) и общий вид (б) изготовленной в металле установки для внутреннего нагрева с используемым внутренним подогревом, встроенным и удаляемым при вращении формующим стержнем

Установка этого типа успешно использовалась при нанесении покрытий на внутренних поверхностях изношенных деталей, в которых в целях сохранения работоспособности наружных поверхностей требовалось применение только внутреннего нагрева [4].

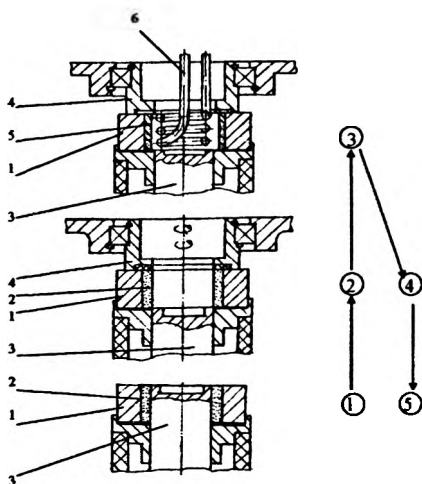
Схема реализации типового технологического процесса нанесения покрытий с внутренним нагревом на установке вертикального типа со встроенным и удаляемым из внутренней полости заготовки формирующего стержня для размещения в ней индуктора показана на рисунках 6, 7.

Основной недостаток приведенного технологического процесса состоит в том, что в данном исполнении процесса затрудняется, а иногда и вовсе исключается возможность нанесения ферромагнитных порошков и содержащих их в качестве основных компонентов шихтовых композиций из-за намагничивания и налипания их на индуктор. В результате для нанесения покрытий внутренним нагревом в открытых формах не используются самые дешевые и не менее

износостойкие, чем хромоникелевые сплавы, самофлюсующие порошки на железной основе и шихтовые смеси на их основе.

Для устранения указанного недостатка предложены новые схемы формования покрытий с использованием внутреннего нагрева и порошковых сплавов на железной основе.

Одна из схем приведена на рисунке 7. Внутренний нагрев обеспечивает поверхностный нагрев с минимальной глубиной проникновения электромагнитного поля в материал детали. Однако, чтобы осуществить технологию нанесения ферромагнитных материалов, потребовался предварительный подогрев слоя до температуры потери его магнитных свойств.

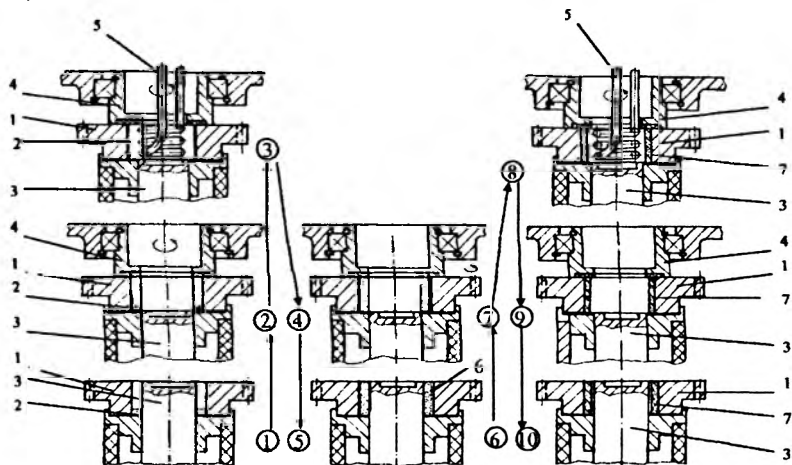


1 – деталь; 2 – порошковая засыпка; 3 – формирующий стержень; 4 – поджимной вращающийся упор; 5 – порошковое покрытие; 6 – индуктор ТВЧ

Рисунок 6 – Схема реализации типового технологического процесса нанесения покрытий с внутренним нагревом на установке вертикального типа со встроенным и удаляемым из внутренней полости заготовки формирующим стержнем для размещения в ней индуктора

Технологические переходы (рисунок 6): ТП1 – размещение на исходной позиции детали 1 и засыпка порошка 2 в зазор, образованный стержнем 3. ТП2 – перевод (→) детали с порошком 2 и стержнем 3 на промежуточную позицию крепления, обеспечиваю-

шей е поджим к упору 4, включение вращения (\odot) и удаление стержня из внутренней полости детали 1. ТПЗ – перевод (\rightarrow) закрепленной и вращаемой детали 1 с удерживаемым на внутренней поверхности порошком 2 и освобожденным от стержня 3 объемом на позиции нагрева, при котором обеспечивается размещение индуктора 6 в рабочей зоне, включение нагрева, выдержка под нагревом, получение нанесенного слоя 5 и отключение нагрева индуктора в рабочей зоне. ТП4 – возвращение (\leftarrow) вращаемой детали 1 на промежуточную позицию, выдержка без нагрева для охлаждения, отключение вращения (\odot). ТП5 – возвращение (\leftarrow) детали 1 с нанесенным слоем 5 при одновременном раскреплении на исходную позицию и ее сьем.



1 – деталь; 2 – флюсовая присадка; 3 – формирующий стержень; 4 – поджимной вращающийся упор; 5 – индуктор ТВЧ; 6 – засыпка порошкового сплава или порошковой композиции; 7 – порошковый слой, формируемый вращением и нагревом

Рисунок 7 – Схема формирования покрытия на внутренней поверхности детали (ступицы зубчатого колеса) нанесением слоя из ферромагнитного порошкового сплава на установке вертикального типа со встроенным и удаляемым из внутренней полости формообразующим стержнем для размещения индуктора и обеспечения внутреннего нагрева

Приведем технологические переходы (ТП) осуществляемого процесса нанесения покрытий (рисунок 7): ТП1 – размещение на

исходной позиции детали 1 и засыпки флюсовой присадки 2 в зазор, образованный стержнем 3. ТП2 – перевод (→) детали 1 с флюсовой присадкой 2 и стержнем 3 на промежуточную позицию крепления, обеспечивающей ее поджим к упору 4, включение вращения (↻) и удаление стержня из внутренней полости детали 1. ТП3 – перевод (→) закрепленной и вращаемой детали 1 с удерживаемой на внутренней поверхности флюсовой присадкой 2 и с освобожденным от стержня 3 объемом на позицию нагрева, при котором обеспечивается ввод индуктора 6 в рабочую зону, включение нагрева, выдержка под нагревом для расплавления и растекания флюса, достижения на внутренней поверхности заданной расчетной температуры, способной за счет теплопередачи нагревать порошковую массу сплава, размещаемую в объеме зазора, до температуры точки Кюри, отключение нагрева. ТП4 – возвращение (→) офлюсованной детали 1 на промежуточную позицию, отключение вращения (↻). ТП5 – возвращение (→) детали 1 при одновременном ее раскреплении на исходную позицию. ТП6 – засыпка порошкового сплава в зазор, образованный, формирующим стержнем 3 и нагретой деталью 1. ТП7 – повторение технологического перехода 2 с засыпанным и нагретым до температуры точки Кюри порошком 6 для закрепления включения вращения и удаления стержня 3. ТП8 – повторение технологического перехода 3 для обеспечения вторичного нагрева заготовки 1, слоя 6 и нанесения порошкового покрытия 7 из сплава. ТП9 – повторение технологического перехода 4 для отключения вращения (↻), раскрепления и возвращения (→) детали с покрытием 7 на исходную позицию. ТП10 – съем готовой детали 1 с покрытием 7.

Выводы

1. В результате анализа проведенных исследований для реализации технологии получения покрытий из ферромагнитных материалов на внутренние поверхности деталей предложено использование двухступенчатого технологического цикла, заключающегося в предварительном разогреве заготовки детали до температуры, превышающей температуру Кюри, последующую засыпку присадочного материала и окончательный нагрев до температуры спекания или плавления этого материала. Получено математическое соотношение для выбора температуры предварительного нагрева заготовки,

обеспечивающей переход наносимого материала из ферромагнитного в парамагнитное состояние.

2. Металлографические исследования показали, что уменьшение температуры нанесения покрытия до 1300–1200 К нежелательно, так как приводит к образованию спеченной пористой структуры у покрытия и значительному (15–25 %) снижению его прочности сцепления с основой детали. Напротив, увеличение температуры до 1500 К и выше недопустимо вследствие возможного перегрева материала детали и образования грубой структуры у покрытия. Поэтому для получения качественных покрытий температура наплавки порошка самофлюсующегося сплава на железной основе ПР-Х4Г2Р4С2Ф должна находиться в пределах 1370–1450 К.

3. Разработанные технологические схемы, устройства и оснастка для осуществления процессов центробежного нанесения покрытий с использованием двухступенчатого индукционного нагрева позволяют получать качественные покрытия из порошков самофлюсующихся сплавов на железной основе с высокими физико-механическими свойствами на внутренних поверхностях деталей.

Литература

1. **Гафо, Ю.Н.** Порошковые материалы на железной основе, используемые для создания износостойких покрытий / Ю.Н. Гафо, А.В. Сосновский, И.А. Сосновский // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: материалы 2-й Промышл. Междунар. научн.-техн. конф., п. Славское, 25 февраля–1 марта 2002 г.– Киев: УИЦ «Наука, техника, технология», 2002. – С. 49–50.

2. **Кашицин, Л.П.** Схемы формующих наладок для реализации центробежно-индукционной технологии припекания покрытий в процессах восстановления и изготовления биметаллических втулок / Л.П. Кашицин, И.А. Сосновский, А.Л. Худoley // Центробежная техника – высокие технологии: материалы Междунар. научн. конф., Минск, 12–14 ноября 2003 года. – Минск: НПРУП «НПО «Центр», 2003. – С. 95–96.

3. **Кашицин, Л.П.** Центробежно-индукционная наплавка ступиц зубчатых колес / Л.П. Кашицин [и др.] // Сварка и родственные тех-

нологии: Республ. межведом. сб. научн. тр. / ПК ООО «Бестпринт», 1999. – Вып. 2. – С. 117–119.

4. Кашицин, Л.П. Технология центробежного нанесения покрытий с использованием внутреннего индуктора ТВЧ / Л.П. Кашицин, [и др.] // Сварка и родственные технологии: Республ. межведом. сб. научн. тр. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск: Тонпик, 2005. – Вып. 7. – С. 53–62.

УДК 669.041

Т.Н. СИНИЧЕНКО (БНТУ)

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В Республике Беларусь собственные запасы топливно-энергетических ресурсов ограничены, и необходимость их импортирования делает экономику зависимой от внешних поставщиков и уязвимой по отношению к резким колебаниям цен на энергоресурсы. При этом энергоёмкость внутреннего валового продукта в Беларуси в полтора-два раза выше, чем в развитых государствах со сходными климатическими условиями и структурой экономики. Высока и материалоемкость выпускаемой продукции, недостаточно полно используются вторичные ресурсы и отходы производства [1]. В этих условиях проблема энерго- и ресурсосбережения становится одной из первоочередных и актуальных.

В суммарном потреблении топливно-энергетических ресурсов промышленным комплексом Республики Беларусь доля термических и химико-термических производств составляет свыше 10 %. Оборудование в термическом производстве на большинстве предприятий республики не отвечает современным требованиям. В большинстве своем оно морально и физически устарело, имеет высокую энергоёмкость (таблица 1).

В этих условиях Правительством Республики Беларусь проводится энергетическая политика, направленная на модернизацию и трансформацию топливно-энергетического комплекса, снижение энергоёмкости всех видов продукции, разработку и внедрение но-