

Применение композитных пленочных материалов для маркировки машиностроительной продукции



Е. И. Прянин,
заведующий кафедрой
материаловедения
и технологии
художественных изделий
(МиТХИ)¹, профессор,
докт. техн. наук, эл. почта:
e.p.mazernbc@yandex.ru



Е. Ю. Жданова,
аспирант кафедры МиТХИ¹,
эл. почта:
ivan.grey.90@mail.ru



Д. М. Шарапова,
доцент кафедры МиТХИ¹,
эл. почта:
sharapova_dm@pers.spmi.ru



А. Ю. Дранова,
аспирант кафедры МиТХИ¹,
эл. почта:
s225020@stud.spmi.ru

Рассмотрено использование пленочных материалов для лазерной маркировки химически стойких этикеток. Эти этикетки приклеивают к изделию, они являются несъемными, разрушаясь при попытке переклеивания, что обеспечивает защиту от фальсификации информации. Данная технология предпочтительнее прямой лазерной маркировки на изделии, так как позволяет избежать ухудшения качества маркировки из-за коррозии или высоких температур. Новые композитные пленочные материалы для использования в лазерной маркировке ответственных изделий в машиностроительной и металлургической отраслях промышленности, работающих в условиях агрессивных сред и высоких температур. Предложены клеящиеся высокотемпературные пленочные материалы, а также материал для маркировки раскаленных изделий с применением пристрелочного пистолета. Представлены исследования температурной и химической стойкости пленок для лазерной маркировки в различных условиях эксплуатации. Изучены образцы пленок, нанесенные на стальные пластины 10X18H9, которые затем нагревали до определенных температур и проверяли на стабильность маркировки. Приведено исследование качества лазерной маркировки, которое обеспечивают разработанные пленки. В ходе работы пленки обработали на волоконной лазерной системе, после чего провели сравнение с качеством изображения на полимерных лазерных пленках. Оценили химическую стойкость пленок после взаимодействия с агрессивной средой через разные промежутки времени. Образцы проверяли на их внешний вид и контрастность маркировки. Результаты исследований могут быть полезны для разработки технологий лазерной маркировки в машиностроительной и металлургической отраслях.

Ключевые слова: маркировка, штрихкод, лазерная обработка, термостойкость, химическая стойкость, кремнийорганика, композитный пленочный материал, контрастная маркировка, клей постоянной липкости.

DOI: 10.17580/chm.2024.09.15

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Введение

В последние годы наметилась тенденция в использовании для лазерной маркировки композитных полимерных самоклеящихся пленочных материалов, из которых изготавливают химически стойкие практически ко всем агрессивным веществам этикетки [1]. На эти этикетки при помощи маркировочных лазерных станков или лазерных принтеров наносят цифробуквенную информацию, в том числе с использованием

двухмерных штрихкодов. Важной особенностью таких этикеток является их способность приклеиваться к поверхности изделия с помощью клея постоянной липкости Pressure Sensitives Adhesive (PSA), являющегося одним из компонентов композиционного пленочного материала и защищенного съемным лайнером от контакта с внешней средой [2]. Кроме того, такие этикетки обладают еще одним важным свойством — они являются несъемными и при попытке переклеивания разрушаются, исключая тем самым возможность

их замены на другую этикетку с фальсифицированной информацией [3].

Применение для лазерной маркировки композитных полимерных пленок вместо прямой лазерной маркировки непосредственно на самом изделии (Direct Part Marking, DPM) обусловлено необходимостью исключения снижения качества нанесенной лазером информации в результате коррозионного или высокотемпературного воздействия среды, в которой эксплуатируется изделие [4, 5]. Технология приклепления металлических шильд механическим способом становится неактуальной из-за повышенных затрат на расходные материалы. Например, при нанесении информации на детали горных машин, привода штанговых насосов и карьерного экскаватора используют DPM для создания устойчивых к износу и коррозии надписей, но и они не всегда сохраняют свою читаемость в течение всего срока службы оборудования [6–8]. С развитием технологий изготовления изделий машиностроения и ужесточением условий их эксплуатации использование лазерной маркировки с самоклеющимися пленочными этикетками стало более целесообразным. Это привело к увеличению требований к базовым характеристикам композитных пленочных материалов для информационных этикеток. Так, в первую очередь необходимы материалы с более высокой температуростойкостью при постоянном нагреве до температуры 300 °С. Например, при работе автономного электротехнического комплекса возникают высокие температурные режимы, которые зависят от нагрузки, типа оборудования и условий эксплуатации, а при использовании лазерной маркировки этикетками для создания устойчивого к коррозии электротехнического оборудования можно снизить потери и повысить надежность оборудования [9]. Для некоторых отраслей машиностроения требуются не только самоклеющиеся многослойные пленочные материалы, чувствительные к лазеру, но и пленки с термостойкостью в интервале температур от 300 до 600 °С, готовые этикетки из которых могут быть приклеены к изделию с использованием специального высокотемпературного клея [10, 11]. В металлургическом производстве при изготовлении непрерывного литого проката необходимы пленки для лазерной маркировки с термостойкостью до 1100 °С, присоединение которых к раскаленному изделию предполагается механическим способом с использованием специального пистолета и шпилек [12, 13]. Во-вторых, необходимо, чтобы применяемые пленочные материалы обеспечивали сохранение качества нанесенной лазером

информации во всех агрессивных средах, в том числе в кислотах, щелочах, бензине, масле и органических растворителях. Применяемые в настоящее время для лазерной маркировки самоклеющиеся полимерные пленочные материалы не обеспечивают в полном объеме указанные требования, а также являются импортными материалами (табл. 1). Из-за санкций использование некоторых видов пленочных материалов ограничено. Кроме того, значительно возросла стоимость этих пленок, что также ограничивает их широкое использование. Отечественная разработка полимерной пленки марки НПМ012, представленная АО «Научные приборы» [14, 15], имеет характеристики ниже, чем у существующих импортных лазерных полимерных пленок (см. табл. 1).

Целью данной научно-исследовательской работы является научное обоснование и разработка новых композитных пленочных материалов, которые позволят шире использовать лазерную маркировку для ответственных изделий в машиностроении и металлургии [16]. Для температур до 300 °С предложено использовать самоклеющиеся пленки (ЛП1), от 300 до 600 °С — пленки (ЛП2), присоединяемые к изделию с помощью высокотемпературного клея, от 700 до 1100 °С — пленки (ЛП3), прикрепляемые к раскаленному изделию с помощью специального пистолета и шпилек.

Для определения базового слоя разрабатываемых композитных пленок выполнен анализ литературных данных о максимальных рабочих температурах различных полимерных материалов [17, 18]. Установлено, что органические полимеры стабильны только при постоянном нагреве до температуры 150–200 °С, потому рассмотрели другие группы полимеров: элементоорганические и неорганические.

Для достижения цели в ходе исследования изменили составы пленок и использовали новые основы. Существовавшие пленки не обладали нужной термостойкостью (см. табл. 1), поэтому предложили новые составы слоев и специальные клеи. Требовалось определить состав контрастного и информационного слоев, которые обеспечивали бы стойкость к температуре и агрессивным средам для каждого вида композитных пленок, а также выбрать состав клеев с постоянной липкостью и высокотемпературных клеев, которые обеспечили бы надежное соединение композитных пленок с поверхностью маркируемых изделий в диапазоне температур от –50 до 300 °С для самоклеящихся пленок и до 600 °С для несамоклеящихся пленок; проверить качество лазерной маркировки на разработанных композитных пленках

Таблица 1

Основные характеристики применяемых полимерных лазерных пленок

Марка пленки (страна-производитель)	Состав основы композитной пленки	Температура эксплуатации, °С		Стойкость в агрессивных средах Высокая с ограничением в следующей среде
		min	max длительная	
3М 7848 (США)	Модифицированный полиакрилат	–50	+200	Органический растворитель, спирт
tesa 6930 (Германия)	Модифицированный полиуретан	–50	+150	Без ограничений
НПМ012 (Россия)	Полиметилметакрилат одифицированный поли(о-гидроксиамидами)	–50	+140	Органический растворитель, ацетон

и обработать режимы лазерной маркировки, которые обеспечивают формирование контрастных изображений, включая изображения штрихкодов, легко считываемых сканирующими устройствами.

Материалы и методика исследования

Для работы при высоких температурах наибольший интерес представляют кремнийорганические полимеры на основе смол, максимальная температура эксплуатации которых достигает 700 °С; модифицированные смолы позволяют получить покрытие с рабочей температурой до 1200 °С [19–21]. Основу неорганических полимеров составляют оксиды кремния, алюминия, магния и др. [22, 23]. Из этих полимеров наиболее интересны алюмосиликатные материалы с максимальной термостойкостью от 500 до 1100 °С [24]. Таким образом, в исследовании определили базовые температуростойкие материалы, которые использовали для разработки нового класса композитных пленочных материалов для эксплуатации при нагреве до 1100 °С.

Для проведения оценки термостойкости пленок изготавливали образцы: пленку с нанесенной маркировкой крепили на пластины толщиной 5 мм из коррозионностойкой стали 10X18H9, которые имитировали поверхность изделий. Термостойкость образцов оценивали путем нагрева их в лабораторной печи с последующим медленным или быстрым охлаждением. Температуру изменяли с шагом 50 и 100 °С, а нагрев изучали в диапазоне от 200 до 1100 °С. Самоклеящиеся пленки изучали при нагреве до 200 и 300 °С, а высокотемпературную опытную пленку, нанесенную на металл с использованием высокотемпературного клея, — до 600 °С. Пленку для маркировки горячего металла, нанесенную на стальную пластину механическим способом, подвергали нагреву до температуры 1100 °С [1].

Качество лазерной маркировки разработанных композитных пленок, которое важно для создания четкого контрастного изображения на пленочном материале, оценивали в сравнении с изображением, получаемым на существующих полимерных пленках. Обработку выполняли с помощью волоконной лазерной системы ТурбоМаркер-В20 с F-Theta-объективом, обеспечивающим рабочее поле до 110×110 мм [25, 26]. Средняя выходная мощность равна 20 Вт. Максимальная энергия в импульсе 1 мДж. Длина волны лазерного излучения 1,064 мкм (Yb:YAG) [27, 28]. Для теста определены оптимальные режимы маркировки для каждой пленки (табл. 2).

Оценку состояния пленок, взаимодействовавших с агрессивной средой, проводили через 1, 2, 4, 8, 16, 24, 48, 96, 168 ч после помещения образца в сосуд с различной химической средой [29]. Обращали внимание на видимые изменения его общего внешнего вида и на контрастность нанесенного кода [30]. Изучали следующие агрессивные среды: азотная кислота (5 % HNO₃); серная кислота (5 % H₂SO₄); гидроксид натрия (5 % NaOH); масло и-20 (мазут, S < 1 %); бензин нефрас-с2-80/120 (фракция деароматизованного бензина); керосин (смесь жидких углеводородов); растворитель «646» (этанол 15 %; бутанол 10 %; толуол 50 %; ацетон 10 % и др.); ацетон (C₃H₆O, 100 %); спирт изопропиловый (C₃H₈O, 95 %);

вода водопроводная (H₂O с примесями); вода дистиллированная.

Результаты исследования и их обсуждение

Используя две группы элементоорганических и неорганических материалов, разработали три новые группы композитных многослойных пленочных материалов, каждая из которых состоит из силикатного основного слоя с различным содержанием оксидов кремния и алюминия, который служит подложкой. На одной стороне слоя наносятся два слоя кремнийорганики — контрастный белый слой и лицевой лазерочувствительный черный слой. С другой стороны наносится тонкий клеевой слой (рис. 1). Для композитной пленки, предназначенной для маркировки деталей при обычных климатических условиях и постоянном нагреве не более 300 °С, клеевой слой наносят на обратную сторону несущего слоя в процессе изготовления композитного материала и представляет собой PSA-клеи. При необходимости применения разработанного пленочного материала для маркировки машиностроительных деталей, работающих при температурах от 300 до 600 °С, на обратную сторону несущего слоя наносят высокотемпературостойкий клей из композиции КОЗ-3 и натриевого жидкого стекла, при этом его наносят уже на готовую этикетку с уже нанесенной лазерной маркировкой непосредственно у производителя маркируемой детали [31]. В отличие от двух других новых пленок, третий вариант содержит больше оксидов алюминия и соединяется с изделием механически.

Таблица 2

Оптимальные режимы маркировки для изучаемых лазерных пленок

Марка пленки	Доля от средней выходной мощности P, %	Скорость перемещения луча V, мм/с
ЗМ 7848	35	100
tesa 6930	35	1000
НПМ012	25	1000
ЛП2	35	1000

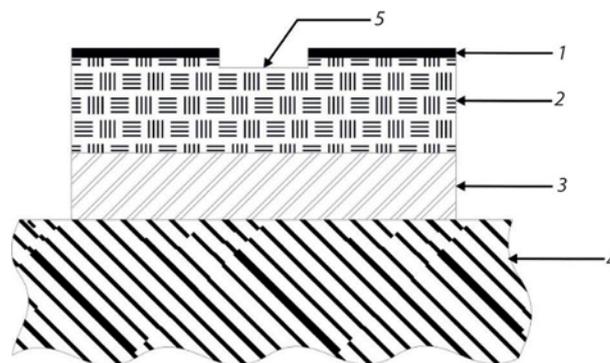


Рис. 1. Схема маркированной лазером пленки ЛП1 на поверхности изделия: 1 — лицевой информационный лазерочувствительный слой; 2 — контрастный слой несущей подложки; 3 — клеевой слой; 4 — поверхность изделия; 5 — зона маркировки

Важной частью проводимого исследования являлось определение термостойкости изучаемых лазерных пленок. Первоначально выполнили сравнительное изучение лазерных пленок tesa 6930, 3M 7848, НПМ012 и ЛП1 при нагреве до 300 °С с выдержкой в течение 1 ч. Пленку ЛП1 тестировали с использованием разных PSA-клеев: акрилового и каучукового. Результаты исследования пленок после нагрева в печи и охлаждения на воздухе показаны на **рис. 2**. Как и предполагали, пленки tesa 6930 и 3M 7848 сильно деформировались под действием температуры 300 °С, и нанесенный код стал менее контрастным. Пленка НПМ012 начала образовывать локальные дефекты и сворачиваться из-за внутренних напряжений. Опытные образцы пленки ЛП1 полностью сохранили свою форму и высокую контрастность штрихкода, подтверждая их высокую термостойкость до 300 °С. При использовании акрилового клея PSA пленка ЛП1 начала отклеиваться из-за того, что клей не выдерживает температуру выше 250 °С. Каучуковый клей сохраняет свои липкие свойства и будет использован в дальнейших исследованиях в составе композитной самоклеящейся пленки ЛП1.

Затем исследовали термостойкость опытного лазерного материала ЛП2. Использовали термостойкий клей для крепления образцов пленки к пластинам из стали марки 10X18Н9 с обработанной лазером поверхностью [32–34]. Далее образцы нагрели в печи до температур 300, 400, 500 и 600 °С. Анализ изображений на **рис. 3** показал, пленка ЛП2 обладает

хорошей термостойкостью и обеспечивает надежное считывание данных при всех указанных температурах.

На следующем этапе исследования оценили жаропрочность пленки ЛП3. Подготовленные образцы пленки размером 200×75 мм с кодами DataMatrix 50×50 мм, прикрепленные к стальной пластине толщиной 5 мм, имитирующей корпус детали, поместили в печь, разогретую до температуры 1100 °С. В других сериях экспериментов образцы помещали в холодную печь, где затем нагревали до 1100 °С, выдержка в печи составляла от 1 до 5 ч. На **рис. 4** показано состояние пленки до и после воздействия температуры 1100 °С, далее пленка остывала до комнатной температуры. Можно отметить, что пленка и изображения на ней сохраняют свои свойства при температуре до 1100 °С.

Качество лазерной маркировки путем оценки штрихкодов DataMatrix, созданных на пленочных материалах по технологии DPM, изучали с помощью сканера LVS-9585 — портативного ручного аппарата, предназначенного для проверки соответствия кодов стандартам ISO/IEC 15415/15416 (**рис. 5**). Сканер позволяет программно анализировать параметры контрастности и модуляции кода. Каждому параметру присваивается балл от 0 до 4 (наивысший балл). Оценку кода определяли по наименьшему из полученных параметров, при этом оценку обозначают латинскими буквами от F до A (от наихудшей к наилучшей), т. е. если большинство показателей имеют значение 4, но хотя бы один из них равен 3, то общая оценка будет B.

Различия между параметрами для штрихкодов в каждой группе изучаемых пленок представлены в **табл. 3**.

Кремнийорганическая пленка ЛП имеет после маркировки шероховатый рельеф поверхности, как и пленка НПМ012, но ввиду того, что кремнийорганическое связующее



Рис. 2. Фотографии пленок tesa 6930, 3M 7848, НПМ012 и ЛП1 (ЛП_{1а}, ЛП_{1б} — с акриловым и каучуковым PSA-клеем соответственно), наклеенных на поверхности пластин из стали 10X18Н9, после нагрева на 100 (а), 150 (б), 200 (в), 250 (г) и 300 (д) °С; размер QR-кода 10×10 мм

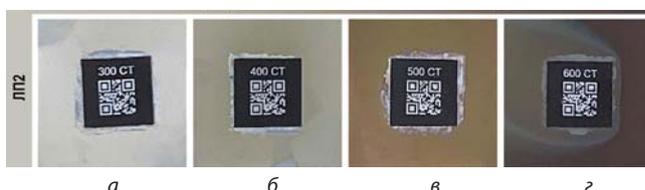


Рис. 3. Фотографии жаростойкой пленки ЛП2 после нагрева на 300 (а), 400 (б), 500 (в) и 600 (г) °С; размер QR-кода 10×10 мм

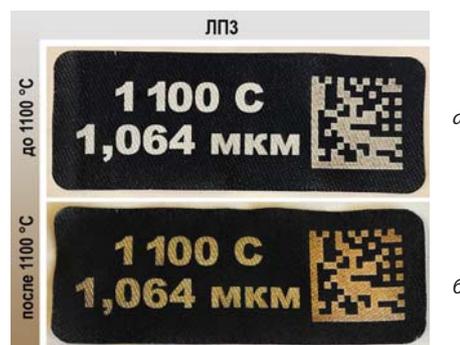


Рис. 4. Изображение маркировки на пленке ЛП3 до (а) и после (б) нагрева до температуры 1100 °С

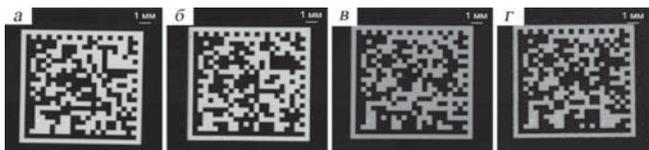


Рис. 5. Коды DataMatrix, нанесенные лазером на пленки: 3М 7848 (а); tesa 6930 (б); НПМ012 (в) и ЛП2 (г); размер кода 12×12 мм

с пигментом белого красителя в пленке ЛП обладает высокой светоотражающей способностью, это компенсирует эффект рассеивания света ее шероховатой поверхности. В результате пленка ЛП обеспечивает нанесение двумерных кодов с наивысшим классом А.

Результаты химической стойкости разработанных новых лазерных пленок серии ЛП в различных средах, показали их высокую химическую стойкость и качество маркировки без изменений после 168 ч.

В результате всех проведенных исследований в данной работе были разработаны новые композитные лазерочувствительные пленочные материалы с высокими характеристиками температуростойкости и стойкости в агрессивных химических средах. Данные о характеристиках разработанных новых композитных пленок ЛП1, ЛП2 и ЛП3 представлены в **табл. 4**.

Результаты изучения жаростойкости этикеток из новой самоклеющейся композитной пленки ЛП1 показали, что этикетки из нее полностью сохранили свою форму и высокую контрастность штрихкодов, подтверждая высокую термостойкость пленки до 300 °С во всех изученных агрессивных средах.

Исследование свойств разработанной композитной пленки ЛП2 подтвердило термостойкость изготовленных на ее основе этикеток в диапазоне температур до 600 °С при использовании жаростойкого клея КОЗ для соединения этикеток с изделиями. Этикетки на этой пленке также продемонстрировали высокую стойкость покрытия и необходимое качество контраста штрихкодов во всех исследованных агрессивных средах.

Результаты исследования свойств новой композитной пленки ЛП3 показали, что она обеспечивает термостойкость этикеток до 1100 °С при механическом соединении этикеток с изделием.

Исследование контрастности наносимых штрихкодов на новых разработанных композитных пленочных материалах серии ЛП показало, что они позволяют маркировать двумерные коды класса А с высоким качеством и хорошей сохранностью кодов после нагрева до соответствующих высоких температур.

Таблица 3

Результат оценки сканирования двумерных кодов и отличительных параметров по ISO/IEC 15415/15416

Параметр	3М 7848	tesa 6930	НПМ012	ЛП
Контраст, % (класс)	82,0 (4,0)	76,0 (4,0)	56,0 (3,0)	71,0 (4,0)
Осевая неравномерность, % (класс)	0,6 (4,0)	0,6 (4,0)	0,6 (4,0)	0,9 (4,0)
Неоднородность сетки, % (класс)	3,0 (4,0)	4,0 (4,0)	2,0 (4,0)	5,0 (4,0)
Оценка кода (А–F)	A	A	B	A

Таблица 4

Основные характеристики разработанных лазерных пленок

Марка пленки	Состав основы композитной пленки	Температура эксплуатации, °С		Стойкость в агрессивных средах
		min	max длительная	
ЛП1	Силикатный неорганический полимер	-50	+300	Высокая с ограничением в следующей среде Без ограничений
ЛП2	Силикатный неорганический полимер		+600	
ЛП3	Кремнеземный неорганический полимер		+1100	

Выводы

В ходе исследования с применением элементоорганических и неорганических полимерных материалов создан состав новых композитных пленочных материалов с повышенной термостойкостью и устойчивостью к коррозии для лазерной маркировки изделий, применяемых в машиностроении и металлургии. ■

Библиографический список

См. англ. блок

"Chernye metally", 2024, No. 9, pp. 93–98
DOI: 10.17580/chm.2024.09.15

Application of composite film materials for marking engineering products

Information about authors

E. I. Pryakhin, Dr. Eng., Prof., Head of the Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹, e-mail: e.p.mazembc@yandex.ru;

E. Yu. Zhdanova, Postgraduate Student, Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹, e-mail: ivan.grey.90@mail.ru;

D. M. Sharapova, Associate Prof., Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹, e-mail: sharapova_dm@pers.spmi.ru;

A. Yu. Dranova, Postgraduate Student, Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹, e-mail: s225020@stud.spmi.ru

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Abstract: The article discusses the use of film materials for laser marking of chemically resistant labels. These labels are able to stick to the product and are non-removable, collapsing when trying to re-glue, which provides protection against falsification of information. This technology is preferable to direct laser marking on the product, as it avoids deterioration of the marking quality due to corrosion or high temperatures. New composite film materials for use in laser marking of critical products in the machine-building and metallurgical industries operating in aggressive environments and high temperatures. Adhesive and high-temperature film materials are proposed, as well as material for marking incandescent products using a sighting pistol. Studies of the temperature and chemical resistance of films for laser marking in various operating conditions are presented. Samples of films deposited on 10Kh18N9 steel plates were studied, which were then heated to certain temperatures and checked for marking stability. A study of the quality of laser marking, which is provided by the developed films, is also given. During the work, the films were processed on a fiber laser system, after which a comparison was made with the image quality on polymer laser films. The chemical resistance of the films after interaction with an aggressive medium at different time intervals was evaluated. The samples were checked for their appearance and contrast markings. The research results can be useful for the development of laser marking technologies in the engineering and metallurgical industries.

Key words: marking, barcode, laser processing, temperature resistance, chemical resistance, organosilicon, composite film material, contrast marking, pressure sensitive adhesive.

References

1. Troshina E. Yu., Alkhimova V. A. Temperature resistance of laser films in mechanical engineering marking. *Innovations and development prospects of mining engineering and electromechanics: IPDME-2021: VIII International scientific and practical conference. Collection of abstracts. St. Petersburg, April 22–23, 2021*. St. Petersburg Mining University, 2021. pp. 128–131.
2. Wang Y. J. et al. Polymer pressure-sensitive adhesive with a temperature-insensitive loss factor operating under water and oil. *Advanced Functional Materials*. 2021. Vol. 31, Iss. 48. 2104296. DOI: 10.1002/adfm.202104296.
3. Yankov P. New type of laser-marked security label. *Optics and Photonics for Counterterrorism and Crime Fighting II. SPIE*. 2006. Vol. 6402. pp. 158–162. DOI: 10.1117/12.689732.
4. Desavale S. et al. Direct part marking (DPM) supported by additively manufactured tags to improve the traceability of castings. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. 2022. pp. 244–251. DOI: 10.1007/978-3-031-16407-1_29.
5. Zhang L. et al. A study of laser direct-part marking of 2D code on the aviation aluminum alloy part. *Advanced Laser Processing and Manufacturing IV. SPIE*. 2020. Vol. 11546. pp. 67–77. DOI: 10.1142/S0217979220502665.
6. Ganzulenko O. Y., Petkova A. P. Energy efficiency of the linear rack drive for sucker rod pumping units. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. pp. 325–338.
7. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Sheshukova E. I., Nedashkovskaya E. S. Efficiency of operation of a quarry excavator as an ergatic system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023. No. 11-1. pp. 144–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_144.
8. Klevtsov V. A., Timofeev D. Y., Khalimonenko A. D. Improved design of manufacturing processes for mining machines: basing concepts. *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43, Iss. 11. pp. 1367–1375. DOI: 10.3103/S1068798X23110151.
9. Shpenst V. A., Belsky A. A., Orel E. A. Improving the efficiency of autonomous electrical complex with renewable energy sources by means of adaptive regulation of its operating modes. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. pp. 479–492.
10. Bazhin V. Y., Issa B. Influence of heat treatment on the microstructure of steel coils of a heating tube furnace. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249. pp. 393–400. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.8.
11. Gromyka D. S., Gogolinskiy K. V. Method of state and residual resource assessment of excavator bucket tooth caps. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. Vol. 58. Iss. 5. pp. 381–390. DOI: 10.1134/S1061830922050035.

12. Ağuloğlu S. et al. Denture barcoding: a new horizon. *British Dental Journal*. 2009. Vol. 11, Iss. 206. pp. 589–590. DOI: 10.1038/sj.bdj.2009.477.
13. Syrkov A. G., Yachmenova L. A. Features of obtaining metallurgical products in the solid-state hydride synthesis conditions. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 651–662. DOI: 10.31897/PMI.2022.25.
14. Rudaya L. I., Shamanin V. V., Lebedeva G. K. et al. Laser-sensitive polymer coatings. Patent RF, No. 2522604. Applied: 08.08.2012. Published: 20.07.2014.
15. Elokhin V. A., Gotlib V. A., Vladimirov F. L. et al. Multilayer polymer material for laser engraving and method of production thereof. Patent RF, No. 2736080. Applied: 10.12.2019. Published: 11.11.2020.
16. Ge J. et al. Automatic recognition of hot spray marking dot-matrix characters for steel-slab industry. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol. 34. pp. 869–884. DOI: 10.1007/s10845-021-01830-y.
17. Aloe V. Z., Zhirikova Z. M., Aloe K. V., Tarchokova M. A. Algorithm for calculating the temperature resources of polymeric materials. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta imeni V. M. Kokova*. 2021. No. 1. pp. 39–43.
18. Pashkova T. V., Aleksandrov A. I., Esina M. G., Khongorova O. V. Analysis of the possibility of creating thermally stable polymer films of some phenyl benzoates based on the structure of their low-molecular compounds to ensure safety in technological processes. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*. 2020. No. 4 (37). pp. 118–125.
19. Panina K. S., Danilov E. A., Kurganova Yu. A. Composite materials based on modified organo-silicon binder for use as thermal protection. *MashTech 2022. Innovative technologies, equipment and material security in mechanical engineering*. 2022. pp. 244–246.
20. Shitov R. O., Butuzov A. V. Industrial organosilicon resins (review). Part 1. *Trudy VIAM*. 2023. No. 2 (120). pp. 3–19.
21. Eshmurodov Kh. E. et al. Obtaining and studying modified glyphthalic resins with organosilicon compound. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2020. No. 12-5 (81). pp. 4–8.
22. Kaymanov M. R. Obtaining a ceramic material based on inorganic polymers with a calcium phosphate filler. *Actual issues of chemical engineering and environmental protection: Proceedings of the IX All-Russian conference dedicated to the 55th anniversary of the Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, December 01–02, 2022*. Cheboksary: Chuvash State University named after I. N. Ulyanov. 2022. pp. 186–187.
23. Shaulov A. Yu., Vladimirov L. V., Grachev A. V. et al. Inorganic and hybrid polymers and composites. *Khimicheskaya fizika*. 2020. Vol. 39. No. 1. pp. 75–82. DOI: 10.31857/S0207401X2001015X.
24. Kraynova D. A., Saetova N. S., Polyakova I. G., Kuzmin A. V. Physicochemical properties and stability of aluminosilicate glass sealants for SOFC. *Glass: Science and Practice (GlassP2021): Proceedings of the Third Russian Conference with International Participation, St. Petersburg, September 13–17, 2021*. I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences. St. Petersburg: LEMA, 2021. pp. 63–64.
25. Pompeev K. P. et al. Analysis, topology modification and modeling of the laser head casing taking into account the capabilities of additive equipment. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2021. Vol. 1753, Iss. 1. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012037.
26. Yurevich V. I. et al. Successful starting point selection for two-mirror meniscus scanner optimization for laser machining. *Optical Engineering*. 2019. Vol. 58. Iss. 1. 015109. DOI: 10.1117/1.OE.58.1.015109.
27. Mikhaylov S. B., Gorny S. G., Zhukov N. V. Efficiency of metal ablation by a scanning beam of pulsed radiation of a Yb:YAG fiber laser of nanosecond duration. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2021. No. 3. pp. 5–23. DOI: 10.30791/0015-3214-2021-3-5-23.
28. Amiaga J. et al. Laser oxide reduction during multipass relief forming on carbon steel surface. *Optical and Quantum Electronics*. 2023. Vol. 55. Iss. 6. 522. 10.1007/s11082-023-04688-x.
29. Vedin D. E. Study of laser films for marking for chemical resistance in aggressive and neutral environments. *Problems of the mineral resource complex through the eyes of young scientists: collection of articles of the II Scientific Seminar of students, St. Petersburg, March 15, 2024*. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University, 2024. pp. 36–40.
30. Konchus D. A. et al. Temperature influence on readability of the QR-code on titanium alloy. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 909. pp. 54–59. DOI: 10.4028/p-4hhoi9.
31. Pryakhin E. I., Troshina E. Yu. Composite film material. Patent RF, No. 2808809. Applied: 26.06.2023. Published: 05.12.2023.
32. Pryakhin E. I., Pribytkova D. A. The influence of the quality of surface preparation of pipes for heating networks on their corrosion resistance during operation in underground conditions. *Chernye Metally*. 2023. No. 11. pp. 97–102.
33. Alekseev V. I., Barakhtin B. K., Zhukov A. S. Chemical heterogeneity as a factor of improving the strength of steels manufactured by selective laser melting technology. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242. p. 191. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.191.
34. Amiaga J. V. et al. Groove formation on metal substrates by nanosecond laser removal of melted material. *Metally*. 2021. Vol. 11. Iss. 12. pp. 20–26. DOI: 10.3390/met11122026.