

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЛЬТРАСТРУЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Ли Сюеянь¹

lisueyan@yandex.ru

SPIN-код: 8375-5040

В.В. Семашко²

semaschko1601vlad@mail.ru

SPIN-код: 4472-3362

М.И. Абашин¹

abashin@bmstu.ru

SPIN-код: 3962-9802

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ОХП «НИИ ИП с ОП», Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Рассмотрена актуальная проблема утилизации полимерных композиционных материалов (ПКМ). Сделаны выводы о том, что существующие методы утилизации требуют предварительной сегментации и измельчения ПКМ. Для повышения стойкости инструмента, используемого в процессе измельчения, необходимо переходить на выпуск инструмента, обладающего более высокими физико-механическими характеристиками и имеющего невысокую стоимость. Этими достоинствами обладают биметаллические ножи, образцы которых были изготовлены и прошли производственные испытания. Анализ результатов экспериментов показал, что биметаллические ножи имеют лучшие эксплуатационные характеристики в сравнении с традиционными ножами. Оценка инструмента проходила по группе критериев: изменение радиуса скругления режущей кромки и угла заточки, твердость, площадь уноса металла на единицу длины. Для экспресс-оценки эксплуатационных свойств режущего инструмента предложено использовать технологию ультразвуковой диагностики, которая была реализована с использованием традиционных установок для гидробразивной резки материалов.

Ключевые слова

Утилизация, полимерный композиционный материал, ультразвуковая диагностика, имитационное воздействие, износ, режущая кромка, гидроструя, ракетная техника

Поступила в редакцию 15.05.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Для аэрокосмических технологий характерен длительный цикл их внедрения в серийное производство. Такой путь проделали многие известные и широко используемые сейчас в производстве деталей аэрокосмической техники технологии и материалы. Характерным примером этого может служить опыт внедрения композиционных материалов, а также продолжающийся рост их использования

в технике. Уже сейчас объем этих материалов в конструкциях авиационной техники в некоторых случаях превышает объем металлических материалов (рис. 1).

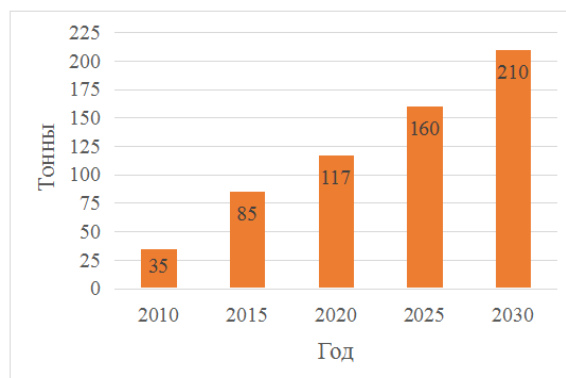


Рис. 1. Объем производства композитов в РФ с прогнозом на 2030 г.

Учитывая достаточно продолжительный жизненный цикл изделий авиационной техники, можно предположить, что с запаздыванием в 7–10 лет человечеству придется столкнуться с острыми вопросами утилизации изделий, в которых велика доля композиционных материалов. Уже сейчас решение проблемы утилизации полимерных композиционных материалов (ПКМ) — серьезная междисциплинарная задача. С учетом специфических свойств ПКМ, таких как стойкость к внешним воздействиям окружающей среды, проблема их утилизации имеет прежде всего экологический характер [1].

Одним из перспективных путей решения проблемы утилизации ПКМ является их вторичная переработка, причем развитие технологий вторичной переработки ПКМ позволяет не только решать проблему утилизации отходов производства и вышедших из строя изделий аэрокосмической техники, но и использовать вторичное сырье для повторной переработки, что способствует экономической эффективности производства целого ряда изделий [2].

Проведенный анализ ситуации, которая сложилась в вопросах утилизации ПКМ в ведущих странах мира, показал, что за последние десятилетия в этой области произошли существенные изменения. Так, если в начале 1990-х годов зарубежные компании только искали технологии переработки ПКМ, то в настоящее время они перешли от теории к практической реализации и промышленной коммерциализации разработанных технологий утилизации.

В настоящее время успехов в этой области достигли Германия, Великобритания, США, Бельгия, Франция, Дания, которые уже выполняют промышленную переработку ПКМ.

В Европейском союзе в качестве базовой технологии утилизации ПКМ принята так называемая совместная утилизация. Эта технология предполагает использование измельченных отходов ПКМ в качестве сырья для производства новых материалов и источника энергии в цементных печах, а также как альтернатива для замены природных ископаемых ресурсов, таких как уголь, нефть

и газ. Метод совместной утилизации рекомендован такими организациями, как European Composites Industry Association (EuCIA), European Plastics Converters (EuPC) и European Composite Recycling Service Company (ECRC) [1].

В настоящее время остро встает проблема утилизации ПКМ в аэрокосмическом секторе промышленности. Так, с учетом ожидаемых результатов реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», общий объем производства ПКМ к 2020 г. (в тоннаже) составит примерно 117...118 т (рис. 1). При этом объем подлежащих утилизации ПКМ может достигнуть 1...3 % годового производства, что с учетом реализации программы может составить десятки тонн отходов [3].

Все существующие и применяемые методы термической и химической переработки ПКМ требуют предварительной сегментации изделий и деталей вплоть до порошкового состояния. А это, в свою очередь, требует создания эффективных методов механической обработки. Сама по себе механическая переработка (измельчение) ПКМ позволит использовать его как сырье для вторичной переработки, в частности получения крошки для заполнения бетонных и железобетонных конструкций в строительстве.

На первом этапе утилизации ПКМ в основном используются механические дробилки. В зависимости от способа дробления дробилки подразделяют на конусные, валковые, молотковые, щековые, роторные.

Наиболее универсальными принято считать роторные дробилки. Это обусловлено их высокой производительностью и эффективностью [4].

Суть работы роторных узлов дробилок для ПКМ заключается в следующем [5]:

- изделия, детали или их фрагменты из ПКМ помещаются в загрузочный бункер, где происходит их захват специальными ножами, закрепленными на роторе;
- резка ПКМ осуществляется между неподвижными лезвиями статора и вращающимися лезвиями, закрепленными на роторе;
- под резательной камерой расположен ситовый экран с ячейками, которые определяют размер гранул на выходе.

К преимуществам этих агрегатов относятся [5]:

- простота и надежность конструкции;
- относительно невысокая стоимость оборудования и его малые габариты;
- простая взаимозаменяемость деталей и узлов;
- высокая производительность;
- возможность варьирования размера помола;
- малое энергопотребление.

К техническим недостаткам технологии можно отнести:

- необходимость перетачивания ножей;
- высокий уровень шума при работе оборудования;
- повышенная запыленность помещений;
- высокая вероятность выхода из строя ножей в случае наличия в изделиях из ПКМ металлических или других твердых материалов;
- отсутствие возможности дробления влажных материалов.

Среди перечисленных недостатков наиболее существенным является необходимость перетачивания ножей. Остановка оборудования приводит к значительным временным и финансовым потерям уже при регламентных работах. Ситуация осложняется в случае нештатного выхода из строя режущего инструмента. Таким образом, из-за все более возрастающего объема ПКМ, для которых требуется утилизация, предъявляются повышенные требования к износостойкости и эксплуатационной прочности режущего инструмента. Поэтому актуальной задачей, требующей решения, является создание ножей, обеспечивающих более высокие показатели по эффективности, стойкости, прочности и технологичности [1].

В настоящее время в роторных установках применяют монолитные ножи, изготовленные из стали 6ХВ2С (табл. 1). В качестве замены предложено использовать биметалл, состоящий из основы, изготавливаемой из стали 3 (см. табл. 1) и рабочей части из стали 9ХФ (см. табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства сталей

Сталь	σ_t , МПа	σ_b , МПа	Твердость HRC	ψ , %	δ , %
Сталь 6ХВ2С	1680	1770	55–57	18	7
Сталь 3	380–490	57	26–31	25	—
Сталь 9ХФ(90ХФ)	884	930	60–62	—	—

Недостатками ножей, изготовленных из данного материала, является их недостаточная стойкость и высокая стоимость. Анализ показал, что устранить данные недостатки возможно путем перехода на изготовление биметаллических ножей (рис. 2).

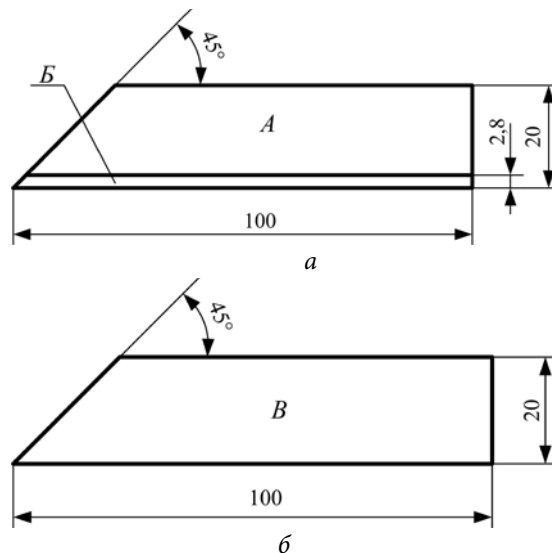


Рис. 2. Принципиальные схемы ножей:

a — биметаллическая конструкция; *b* — традиционная конструкция;
A — сталь 3; *B* — сплав 9ХФ; *B* — сплав 6ХВ2С

На сегодняшний день доля биметаллического инструмента в общем объеме применяемых деталей машиностроения не высока. Об этом свидетельствуют данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

**Количество статей на темы биметаллического инструмента
и биметалла в России и в Китае**

Тема статьи	Год публикации					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<i>В России</i>						
Биметаллический инструмент	2	1	1	1	3	3
Биметалл	48	62	56	51	54	19
<i>В Китае</i>						
Биметаллический инструмент	33	34	48	34	45	23
Биметалл	251	236	259	259	340	189

На основе анализа литературных источников были сделаны выводы о том, что биметаллический режущий инструмент обладает широким спектром положительных эксплуатационных свойств — снижение расхода дорогостоящих легированных инструментальных сталей, возможность самозатачивания, снижение стоимости инструмента и др. [1]. Традиционно для данного вида инструмента помимо прочего большое внимание уделяется вопросу применения эффекта самозатачивания. Одним из перспективных способов достижения самозатачивания является переход на использование слоистых материалов — биметаллов. К двуслойным ножам с односторонней заточкой предъявляют следующие требования [4]:

1) режущий слой должен иметь достаточно малую толщину и обеспечивать износостойкость реза;

2) несущий слой ножа, изнашиваясь вместе с режущим слоем, не должен оголять его, что позволит сохранить форму несущего слоя при естественном износе и обеспечит заданную форму лезвия в нормальном сечении;

3) явление самозатачивания зависит от условий работы и соотношения твердости слоев. При соотношении твердостей слоев меньше оптимального значения происходит затупление режущей кромки. Если соотношение твердостей больше оптимального значения, происходит чрезмерное заострение лезвия и увеличивается вероятность его обламывания.

Для изготовления биметаллических заготовок ножей используют различные технологии, в том числе сварку трением, электроконтактную сварку, сварку взрывом, пайку и др. Работоспособность биметаллического инструмента зависит не только от механических свойств твердого сплава, но и от того, насколько прочным является сварное соединение [5].

Учитывая выполненный анализ и оценив достоинства и возможности получения биметаллических материалов на опытном производстве Научно-

исследовательского института импульсных процессов с опытным производством «НИИ ИП с ОП» (г. Минск, Республика Беларусь) была изготовлена партия биметаллических ножей с закалочным охлаждением в потоке жидкости.

Значения твердости материалов биметаллических ножей и монолитные ножи, изготовленные из стали 6ХВ2С, представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Твердость биметаллических ножей,
изготовленных по различным режимам закалки и отпуска**

Материал	Твердость, HRC		
	Сталь 3	9ХФ	6ХВ2С
Толщина, мм	17,2	2,8	20,0
Термообработка:			
3 + В	35(31)	65	59*
3 + В + О	35(30)	61	
3 + М	30(28)	60	
3 + М + О	30(26)	55	
Схемы термообработки: 3 + В — закалка 840 °С, охлаждение в потоке воды; 3 + В + О — закалка 840 °С, охлаждение в потоке воды, отпуск 170 °С, 2 ч; 3 + М — закалка 880 °С, охлаждение масле; 3 + М + О — закалка 880 °С, охлаждение масле, отпуск 170 °С, 2 ч. Звездочкой * обозначена твердость ножа при стандартной обработке: закалка (охлаждение в масле), низкий отпуск.			

Сравнительный анализ износа режущей кромки ножей проводили путем оценки изменения (увеличения) радиуса округления, переднего угла, а также количества и площади (унос материала) сколов к длине режущей кромки инструмента. Результаты измерений этих параметров представлены в табл. 4.

Необходимо учитывать, что малые значения радиуса закругления режущей кромки ухудшают теплоотвод из очага деформации, а также приводят к разрушениям и выкрашиванию; большие радиусы приводят к разломачиванию и выкрашиванию материала. В случае специфики использования рассматриваемого инструмента предпочтительным является увеличение исходного значения радиусов скругления режущей кромки. Эти факты необходимо учитывать при перетачивания инструмента.

Для определения площади уноса материала были получены фотоизображения ножей, обработку которых проводили в модульной среде обработки изображений с использованием программы Gwyddion. Площадь изношенной поверхности определяли с помощью встроенного в программу математического аппарата.

Из полученных данных следует, что в режущем инструменте в процессе измельчения ПКМ наблюдается заметное искажение его начальной формы и размеров. Это связано с осыпанием и выкрашиванием режущей кромки и соответственно приводит к увеличению радиуса скругления и изменению абсолютных значений переднего и заднего углов.

**Параметры режущих кромок биметаллических ножей,
изготовленных по различным режимам закалки и отпуска**

№ п/п	Вариант технологии изготовления ножа (маркировка)*	Радиус округления режущей кромки, мм	Изменение переднего угла, град	Отношение площади уноса режущей кромки к длине, мм
1	З + В	0,193	0,704	0,31
2	З + В + О	0,297	7,367	0,48
3	З + М	0,255	7,302	0,47
4	З + М + О	0,214	2,844	0,42

* Схемы термообработки см. в табл. 3.

Данные (см. табл. 3) были получены в результате прямых экспериментальных исследований недостатком которых являются значительные временные затраты. Вместе с тем на кафедре СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» разработан имитационный экспресс метод ультразвуковой диагностики (УСД), который позволяет оценивать эксплуатационные свойства материалов по результатам воздействия на них высокоскоростных струй жидкостей (ультраструй). Имитация взаимодействия режущей части инструмента с ПКМ может быть достигнута путем введения в состав воды полимерного порошка. Это позволит изучить результаты воздействия такой ультразвуковой струи на поверхность режущей кромки, а именно оценить и сопоставить глубины образовавшихся гидрокаверн, унос массы и др. [3, 6–8]. Применение ультразвуковой диагностики позволит в лабораторных условиях, причем весьма оперативно, провести сравнительно-сопоставительный анализ режущего инструмента, изготовленного по той или иной производственной технологии [9, 10].

Основные этапы методики диагностики режущего инструмента для утилизации ПКМ:

1) установка диагностируемого образца (режущего инструмента) на рабочем столе установки для гидроабразивной резки материалов с использованием штатных зажимных устройств или тисков с соблюдением выполнения правила шести точек. Необходимо учитывать, что на образец будет оказано силовое воздействие от ультразвуковой струи, которое может повлечь за собой сдвиг образца, приводящий к возникновению погрешностей в параметрах гидрокаверны при проведении последующих измерений. Образец устанавливается на торцевую боковую поверхность ножа. Необходимо учесть, что поскольку выбор скорости подачи S режущей головки определяется экспериментально, следует предусмотреть выделение 1–2 проходов для этих целей;

2) для обеспечения сходимости результатов начало воздействия водополимерной ультразвуковой струи следует выбирать на расстоянии не менее 10 мм от боковой поверхности образца с целью обеспечения выхода гидротехнологического оборудования на номинальную скорость обработки;

3) выбрать и установить с использованием компьютерного обеспечения гидроустановки рекомендуемые технологические режимы и параметры (давление $p = 350$ МПа, скорость подачи S выбирают экспериментально в зависимости

сти от физико-механических свойств обрабатываемого материала (для инструментальных материалов скорость подачи S составит не более 5 мм/с), расстояние от среза сопла до поверхности образца $h = 3,8$ мм);

4) в предварительно опустошенную или новую емкость для подачи абразива необходимо засыпать определенное количество полимерного порошка, размер которого не превышает размера используемого абразивного материала, т. е. порядка 200...250 мкм. Количество порошка непосредственно связано с планируемым числом проводимых экспериментов и изучаемых/диагностируемых образцов;

5) место будущего ультразвукового воздействия на режущем инструменте следует выбирать с учетом того, что в последующем участок с образовавшейся гидрокаверной будет вырезан для обеспечения возможности установки на профилометре, имеющем, как правило, ограничения по высоте измеряемых образцов. В случае диагностирования режущей сменной пластины данный пункт не выполняют;

6) осуществить скрайбирование поверхности образцов на одних и тех же режимах работы гидротехнологического оборудования (см. п. 3). Движение сопловой головки осуществляется параллельно поверхности образца. Угол воздействия может варьироваться в широких пределах $90...45^\circ$. После выполнения прохода следует проверять качество закрепления образца с целью исключения его вибрации и перемещения в любой из плоскостей;

7) снять экспериментальный образец и с помощью профилометра или с использованием оптических средств осуществить измерение параметров гидрокаверны (профиль), данные измерений занести в таблицу;

8) для последующих образцов режущего инструмента действия, описанные в пп. 1–7, повторить.

В заключение сформулируем некоторые общие выводы.

1. Разработка и изготовление биметаллического инструмента для использования в роторных установках по утилизации ПКМ является перспективным и позволит обеспечить достижение оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и восстановлении.

2. Установлено, что производство изделий из композиционных материалов имеет тенденцию к линейному росту, что приведет в частности к возникновению серьезных проблем, связанных с необходимостью последующей утилизации изделий из них.

3. Рост объемов переработки и утилизации ПКМ требует создания специализированного режущего инструмента с высокими показателями износостойкости, ресурса и малой себестоимости изготовления и восстановления.

4. Установлено, что биметаллический инструмент с более высокими показателями твердости режущей пластинки может быть получен при термообработке по режиму закалка на воду.

5. Инструмент с максимальными значениями твердости режущей пластинки показал свою практическую эффективность при проведении натурального эксперимента по измельчению ПКМ в течение 170 часов работы.

6. Перспективами повышения эффективности отработки этапов технологической подготовки производства является использование метода ультразвуковой диагностики режущих материалов с использованием водополимерных ультразвуков.

Литература

- [1] Бибик В.Л. Методы прогнозирования стойкости режущих инструментов. *Фундаментальные исследования*, 2011, № 12-1, с. 81–84.
- [2] Хавин Г.Л. Разрушение и изнашивание режущих кромок инструмента при механической обработке полимерных композиционных материалов. *Вестник НТУ ХПИ*, 2012, № 53(959), с. 66–71.
- [3] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И. Анализ физико-технологических особенностей процесса ультразвуковой диагностики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 11. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/421.html>.
- [4] Барян А.Г. Самозатачивание ножей режущих механизмов из слоистых материалов. Новые перспективные материалы и технологии их получения. *Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 2. Слоистые композиционные материалы*. Волгоград, Гос. Техн. Ун-т, 2004, с. 56–57.
- [5] Савинов Ю.П., Чернов Н.М., Медведев К.А. Технология изготовления композиционного режущего инструмента. *Технология металлов*, 2005, № 10, с. 23–26.
- [6] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий ракетно-космического машиностроения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html>.
- [7] Бурнашов М.А., Прежбилов А.Н. Энергетический анализ процесса нагрева ледяной частицы при водоледающей очистке деталей машин. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2014, № 6(308), с. 96–98.
- [8] Абашин М.И., Барзов А.А., Бочкарев С.В., Галиновский А.Л., Маслов Б.Г. Применение ультразвуковой диагностики для оценки качества сварных швов. *Сварочное производство*, 2014, № 9, с. 26–29.
- [9] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Шутеев В.А. Ультразвуковая экспресс-диагностика материалов и изделий машиностроения. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 2011, № 2(123), с. 141–147.
- [10] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Galinovskii A.L., Abashin M.I., Barzov A.A. Ultra-jet diagnosis of heat treated material microstructure. *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, vol. 59, no. 5-6, pp. 384–388.

Ли Сюеян — магистрант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Семашко Владислав Викторович — заместитель заведующего научно-исследовательской лаборатории композиционных материалов и обработки взрывом обособленного хозрасчетного подразделения «Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством», Минск, Республика Беларусь.

Абашин Михаил Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**DEVELOPMENT OF THE METHOD OF ULTRASTRIAL DIAGNOSTICS
OF A CUTTING TOOL FOR UTILIZATION OF POLYMER COMPOSITE
MATERIALS IN THE DESIGN OF ROCKET-SPACE TECHNOLOGY**

Li Syueyan¹

lisueyan@yandex.ru

SPIN-code: 8375-5040

V.V. Semashko²

semaschko1601vlad@mail.ru

SPIN- code: 4472-3362

M.I. Abashin¹

abashin@bmstu.ru

SPIN- code: 3962-9802

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Research Institute of Pulse Processes with Pilot Production, Minsk, Republic of Belarus

Abstract

The article considers the actual problem of utilization of polymer composite materials (PCM). Conclusions that the existing methods of recycling require preliminary segmentation and grinding of PCM are made. To increase the durability of the tool used in the grinding process, to switch to the production of a tool having higher physical and mechanical characteristics and having a low cost is necessary. These advantages are possessed by bimetallic knives, the samples of which were manufactured and passed production tests. Analysis of experimental results shows that bimetallic knives have better performance characteristics in comparison with traditional knives. The evaluation of the tool according to the group of criteria is carried out: change of the radius of the rounding of the cutting edge and the angle of sharpening, hardness, the area of metal entrainment per unit length. For the rapid assessment of the performance properties of the cutting tool, the technology of ultrasonic diagnostics, which was implemented using traditional waterjet cutting machines, is proposed to use.

Keywords

Recycling, polymer composite material, ultra-jet diagnostics, imitation, wear, cutting edge, hydro-jet, rocket technology

Received 15.05.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Bibik V.L. Metall-cutting tool life forecasting methods. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2011, no. 12-1, pp. 81–84.
- [2] Khavin G.L. Destruction and wearing of tool cutting edges in mechanical treatment of polymer composites. *Vestnik NTU KhPI*, 2012, no. 53(959), pp. 66–71.
- [3] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Abashin M.I. A Physical processing features analysis of ultrajet diagnostics. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 11. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/421.html>.
- [4] Bareyan A.G. Samozatachivanie nozhey rezhushchikh mekhanizmov iz sloistyx materialov. *Novye perspektivnye materialy i tekhnologii ikh polucheniya* [Self-sharpening of cutting machines knives of laminar materials]. *Sb. nauch. tr. mezhd. konf. T. 2. Sloistye*

- kompozitsionnye materialy* [Proc. Int. Conf. Vol. 2. Laminar composites]. Volgograd, Gos. Tekhn. Un-t publ., 2004, pp. 56–57.
- [5] Savinov Yu.P., Chernov N.M., Medvedev K.A. Production technology for composit cutting tools. *Tekhnologiya metallov*, 2005, no. 10, pp. 23–26.
- [6] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L. Problems and prospects of ultra-jet technology in rocket space engineering. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 3. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html>.
- [7] Burnashov M.A., Prezhbilov A.N. The power analysis of process of heating of the ice particle at water ice cleaning of details. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2014, no. 6(308), pp. 96–98.
- [8] Abashin M.I., Barzov A.A., Bochkarev S.V., Galinovskiy A.L., Maslov B.G. Using ultra-jet technology for assessment of welded joints quality. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014, no. 9, pp. 26–29.
- [9] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Shuteev V.A. Ultra-jet express-duagnostics of mechanical engineering materials and products. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SpBPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology], 2011, no. 2(123), pp. 141–147.
- [10] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Galinovskii A.L., Abashin M.I., Barzov A.A. Ultra-jet diagnosis of heat treated material microstructure. *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, vol. 59, no. 5-6, pp. 384–388.

Syueyan Li — Master's Degree student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Semashko V.V. — Deputy Head of the Research Laboratory of composite materials and explosion treatment, Research Institute of Pulse Processes with Pilot Production, Minsk, Republic of Belarus.

Abashin M.I. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.