



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние равноканального углового прессования на качество поверхности алюминиевого сплава В95 после фрезерования

Андрей Филиппов^{1, 2, a, *}, Сергей Тарасов^{1, 2, b}, Олег Подгорных^{1, c}, Николай Шамарин^{1, d},
 Андрей Воронцов^{2, e}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический 2/4, г. Томск, 634055, Россия

^a <http://orcid.org/0000-0003-0487-8382>, avf@ispms.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0003-0702-7639>, tsy@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7758-9242>, podgornysh.o.a@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>, serper89@gmail.com,

^e <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>, vav@ispms.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:

Поступила: 16 октября 2018

Рецензирование: 31 октября 2018

Принята к печати: 08 ноября 2018

Доступно онлайн: 15 декабря 2018

Ключевые слова:

Алюминиевый сплав

РКУП

Фрезерование

Микрогеометрия поверхности

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10013). Металлографические исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23.

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие приборо- и машиностроения основывается на достижении высоких показателей качества и точности размерной обработки современных конструкционных материалов. Важным направлением совершенствования технологий изготовления ответственных изделий является применение материалов с улучшенными физико-механическими свойствами и структурой. Для получения такого рода материалов чаще всего применяют методы интенсивной пластической деформации (ИПД). В результате воздействия ИПД формируется ультрамелкозернистая (УМЗ) структура материала и повышается его прочность. Сохранение структурной целостности и механических свойств является важной задачей при изготовлении деталей из УМЗ-материалов, которые имеют низкую температуру начала рекристаллизационных процессов. При размерной обработке материал подвержен существенному деформационному и тепловому воздействию, что может сказаться на его структурной целостности и механических свойствах. Фрезерование является одним из наиболее распространенных методов получения высококачественных деталей из алюминиевых сплавов. Данный метод является предпочтительным для размерной обработки алюминиевых сплавов с УМЗ-структурой, поскольку он характеризуется локальным воздействием на тонкие приповерхностные слои материала, при котором не возникает существенного нагрева всего объема заготовки. Деформация приповерхностного слоя материала под действием режущего лезвия фрезы формирует микрорельеф поверхности детали. Различия в деформационном поведении крупнокристаллических (КК) и УМЗ-материалов может существенно сказаться на качестве механической обработки последних. В результате известные оптимальные режимы обработки резанием могут оказаться неприменимыми для УМЗ-материалов. **Цель работы:** исследование влияния структурных изменений в алюминиевом сплаве В95 на качество его механической обработки при фрезеровании. **В работе исследованы** образцы из сплава В95 в состоянии поставки и после структурообразования с применением современного металлорежущего инструмента и оборудования, а также рекомендуемых режимов резания. **Методами исследования** являются механические испытания на сжатие и растяжение, оптическая металлография, просвечивающая электронная микроскопия, лазерная сканирующая микроскопия. **Результаты и обсуждение.** На основе полученных экспериментальных результатов можно заключить, что РКУП является эффективным способом повышения качества механической обработки поверхности при фрезеровании алюминиевого сплава В95. В то же время для обеспечения оптимального соотношения качества обработки и высокой механической прочности достаточно двух проходов РКУП при выбранных условиях осуществления процесса структурообразования. Полученные результаты указывают на большой потенциал использования изделий из объемных УМЗ-материалов в промышленности за счет возможности сочетания в них высоких механических свойств и качества механической размерной обработки. Полученные данные могут быть применены при проектировании технологических процессов механической обработки алюминиевого сплава В95 с ультрамелкозернистой структурой в условиях серийного машиностроительного производства.

Для цитирования: Влияние равноканального углового прессования на качество поверхности алюминиевого сплава В95 после фрезерования / А.В. Филиппов, С.Ю. Тарасов, О.А. Подгорных, Н.Н. Шамарин, А.В. Воронцов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 96–106. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-96-106.

*Адрес для переписки

Филиппов Андрей Владимирович, к.т.н., н.с.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
 пр. Академический 2/4,
 634055, г. Томск, Россия

Тел.: 8 (913) 128-72-07, e-mail: avf@ispms.ru

Введение

Алюминиевый сплав В95 относится к системе Al-Zn-Mg-Cu и благодаря высоким механическим свойствам широко применяется в промышленности. Его используют в вагоностроении, авиации, транспортном машиностроении и других отраслях. Преимущественным методом его размерной механической обработки является фрезерование.

Сплав В95 относится к термически упрочняемым, его высокая прочность обеспечивается упрочняющими частицами вторичной фазы. В то же время известно, что возможно комплексное упрочнение двухфазного материала за счет измельчения размеров зерна и перераспределения частиц вторичной фазы [1–2]. Самыми эффективными способами измельчения структуры во всем объеме материала в состоянии твердого раствора являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [3] такие, как ковка, равноканальное угловое прессование (РКУП), прессование с рифлением, накопительная прокатка и др. Эти методы могут быть применены и к сплаву В95 с целью улучшения его физико-механических свойств.

Изменение структурного состояния материала и его механических свойств может существенно сказаться на характеристиках его обрабатываемости при формообразовании резанием (точении, фрезеровании, строгании и т. д.) [4]. В работе [5] приведены результаты исследования обрабатываемости резанием чистого титана в крупнокристаллическом (КК) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии. Авторы указывают на изменение морфологии стружки и повышение качества обработки титана в УМЗ-состоянии, в то время как силовые зависимости и механизм износа режущего инструмента существенно не изменились. В работе [6] исследована обрабатываемость сплава ВТ1-0 и показано, что за счет перевода материала в УМЗ-состояние происходит повышение износостойкости инструмента и снижение шероховатости обработанной поверхности. В работе [7] приводятся результаты обрабатываемости технически чистой меди в УМЗ-состоянии и указывается, что после механической обработки наблюдается рост размеров зерна и снижение плотности дислокаций в приповерхностном слое материала. В работах

[8–9] приведены результаты точения и фрезерования малоуглеродистых сталей в КК- и УМЗ-состоянии. Авторы указывают на следующие особенности обрабатываемости этих материалов. Во-первых, повышение скорости резания может привести к структурным изменениям в УМЗ-материале. Во-вторых, качество обработанной поверхности при точении и фрезеровании повышается в случае обработки УМЗ-материала по сравнению с КК. В-третьих, микротвердость приповерхностного слоя УМЗ-материала после механической обработки существенно не изменяется, тогда как микротвердость приповерхностного слоя КК-материала значительно возрастает. В работе [10] приведены результаты исследования процесса сверления магниевых сплавов AZ91 (аналог МЛ5) в УМЗ-состоянии и показано незначительное увеличение силы резания по сравнению с обработкой КК-материала. В то же время авторы наблюдали лучшее удаление материала в процессе сверления из отверстия, что положительно сказывается на качестве обработки. В работе [11] приведены результаты исследований качества обработки поверхности сплава АМг2 с УМЗ-структурой и показано снижение шероховатости поверхности в 2...7 раз, по сравнению с обработкой материала с КК-структурой. В работе [12] приведены результаты обрабатываемости сплава 6061 (аналог АД33) в УМЗ-состоянии при точении. Показано снижение силы резания и повышение качества обработки поверхности УМЗ-материала, по сравнению с обработкой образцов с КК-структурой.

Указанные выше металлы и сплавы относятся к деформационно-упрочняемым. В свою очередь, сплав В95 является термически упрочняемым. Следовательно, остается неизвестным, как формирование УМЗ-структуры методами ИПД повлияет на его обрабатываемость резанием. В связи с этим целью настоящей работы является исследование влияния структурных изменений в сплаве В95 на качество его механической обработки при фрезеровании.

Методика исследований

Исследовалось влияние равноканального углового прессования (РКУП) на структуру, механические свойства и качество поверхности после обработки резанием (при фрезеровании)

алюминиевого сплава В95. Исследовались образцы в состоянии поставки и образцы после одного, двух и четырех проходов РКУП. Три прохода РКУП являлись малоэффективными, так как материал по механическим свойствам и качеству обработки не отличался от полученного после двух проходов РКУП. В связи с этим в настоящей работе образцы, полученные после трех проходов РКУП, не рассматриваются. РКУП осуществлялось по схеме Вс (между проходами осуществлялся поворот образца вокруг оси его симметрии на угол 90° , без изменения направления деформирования) [3] со скоростью прессования 6 мм/с при температуре 200°C . Режимы интенсивной пластической деформации выбраны на основе данных, изложенных в работах [13–19].

Исследование микроструктуры проводилось методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) при помощи микроскопа JEM-2100 (JEOL Ltd, Japan), а также металлографии при помощи оптического микроскопа METAM LB. При проведении ПЭМ-исследований использовались режимы получения светлопольных изображений и микродифракционных картин (SAED).

Тесты на сжатие и растяжение осуществлялись на испытательной машине Testsystems 110M-10 при комнатной температуре.

Обработка образцов производилась на фрезерном обрабатывающем центре DMC 635 V Eco-line. В качестве режущего инструмента использовались твердосплавные фрезы фирмы Corloу SSEA3008. Режимы обработки: частота вращения шпинделя 8000 об/мин, подача 1520 мм/мин, глубина резания 0,5 мм. Режимы резания назначены с учетом рекомендаций производителя (фирмы Corloу) режущего инструмента.

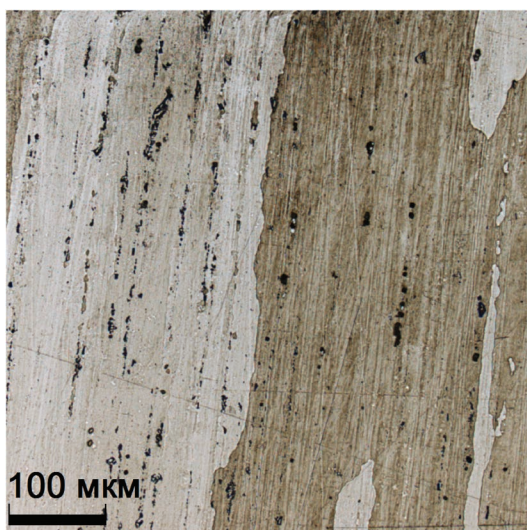
Оценка параметров рельефа обработанной резанием (при фрезеровании) поверхности проводилась с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus OLS 4100. Оценка параметров рельефа обработанной резанием (при фрезеровании) поверхности проводилась с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus OLS 4100. Анализ параметров шероховатости поверхности фрезерованных образцов в состоянии поставки и после РКУП выполнен согласно ГОСТ Р ИСО 25178-2–2014 при помощи лазерного сканиру-

ющего микроскопа. В настоящем исследовании оценивались параметры шероховатости поверхности Sa , Sq и Sz , которые отражают среднее арифметическое, среднеквадратичное и максимальное значение высоты микронеровностей поверхности соответственно. Кроме того, оценивались параметры объема пустот (V_v) и материала (V_m), составляющие впадины и выступы на поверхности, и отнесенные на единицу площади. Параметры объема являются интегральными характеристиками, отражающими соотношение между величиной впадин и пустот рельефа для пиков, впадин и ядра оцениваемой поверхности в расчете на коэффициент смятия ареала. Пикам принадлежат первые 10 % величины коэффициента смятия ареала (КСА), ко впадинам относятся величины от 80 до 100 % величины КСА, а ядру принадлежит диапазон 10...80 % величины КСА. Данные параметры используются для качественной оценки контактной жесткости поверхности [20–21].

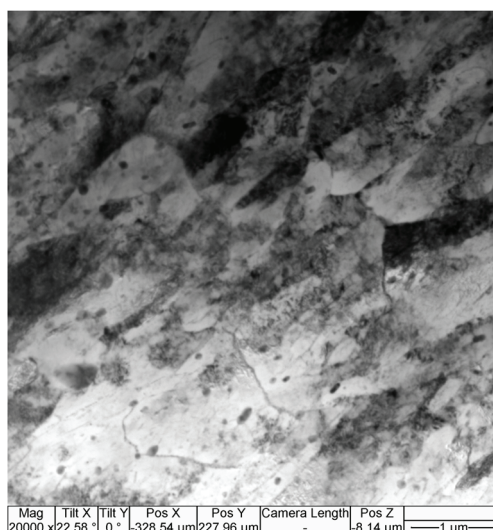
Результаты и их обсуждение

Микроструктура образца в состоянии поставки (рис. 1, а) представлена вытянутыми в направлении прокатки зернами. Их длина превышает 1 мм, ширина составляет 100...200 мкм, также наблюдаются цепочки частиц размером 2...5 мкм. После одного прохода РКУП формируется неравноосная зеренно-субзеренная структура (рис. 1, б). После двух проходов РКУП формируется полосчатая структура (рис. 1, в) с вытянутыми зернами толщиной ~ 80 нм, длиной до 2 мкм (коэффициент неравноосности на отдельных участках достигает 25). После четырех проходов РКУП формируются зерна размером 50...250 нм (рис. 1, г), что свидетельствует о протекании процесса частичной динамической рекристаллизации. Во всех случаях на ТЕМ-изображениях микроструктуры наблюдаются сферические частицы некогерентной равновесной $\eta(\text{MgZn}_2)$ фазы размером ~ 50 нм.

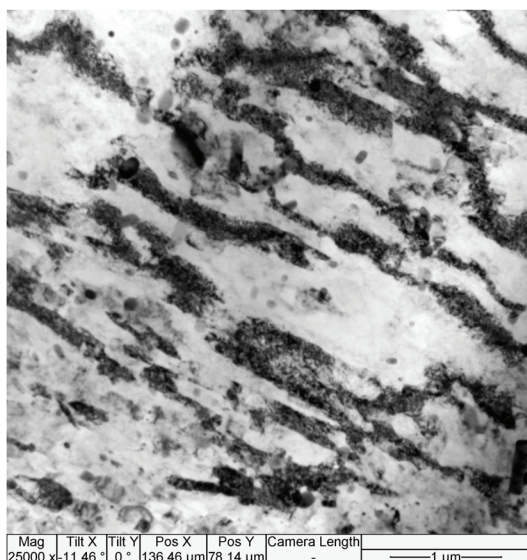
Результаты определения механических свойств образцов до и после структурообразования методом РКУП приведены в табл. 1. Согласно полученным результатам наиболее высокая прочность образцов сплава В95 достигнута после двух проходов РКУП. Условный предел текучести и предел прочности при растяжении



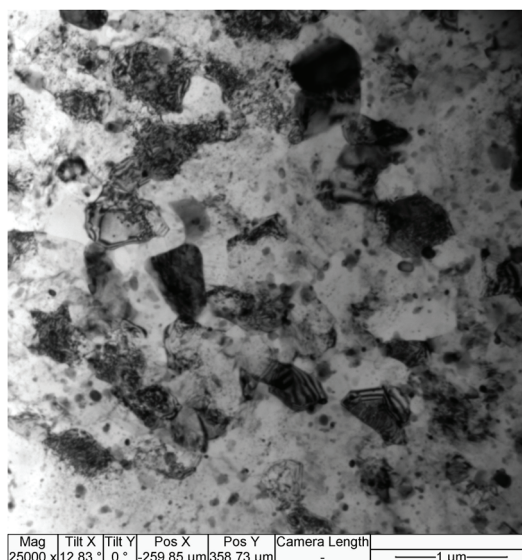
а



б



в



г

Рис. 1. Микроструктура алюминиевого сплава B95 в состоянии поставки (а), после одного (б), двух (в) и четырех (г) проходов РКУП

Fig. 1. The microstructure of aluminum alloy 7075 as-received (a), 1 pass (б), 2 pass (в) and 4 pass (г) ECAPed samples

Таблица 1

Table 1

Механические свойства образцов
The mechanical properties of the samples

Состояние образца	Условный предел текучести при сжатии, МПа	Условный предел текучести при растяжении, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа
Поставка	384	464	558
РКУП 1 проход	349	576	688
РКУП 2 прохода	451	622	771
РКУП 4 прохода	319	557	656

повышаются на 25 и 28 % соответственно, а предел текучести при сжатии – на 15 % по сравнению с образцами в состоянии поставки.

После одного и четырех проходов РКУП прочность образцов при испытаниях на растяжение лишь немного превышает прочность образцов в состоянии поставки, а при сжатии наблюдается снижение величины условного предела текучести. Снижение механической прочности обусловлено условиями термомеханического воздействия в процессе РКУП, а именно достаточно высокими значениями температуры и скорости прессования. В то же время высокая температура прессования является необходимым условием для получения образцов без макроскопических дефектов (трещин, расслоений и т. п.).

После фрезерования на поверхности образцов в состоянии поставки наблюдаются бороздки и частицы материала (рис. 2. а), которые остались после механической обработки в результате механизма обратного адгезионного переноса. Данный механизм заключается в том, что в процессе резания на задней кромке режущего инструмента образуется тонкий слой обрабатываемого материала, который периодически отрывается от фрезы и прилипает обратно на уже обработанную поверхность. Аналогичный механизм наблюдается при взаимодействии инструмента с алюминиевым сплавом в условиях сварки трением с перемешиванием и трением скольжения [22]. Налипшие частицы выступа-

ют над обработанной поверхностью и по высоте (~8 мкм) сопоставимы с бороздками, которые формируются исходя из геометрии инструмента и кинематики процесса фрезерования.

После фрезерования образцов со структурой, сформированной методом РКУП, обработанная поверхность более гладкая, и частиц прилипшего материала не наблюдается (рис. 2. б). Следовательно, обратный адгезионный перенос материала не осуществляется.

Структурообразование методом РКУП приводит к тому, что значения высотных параметров шероховатости фрезерованной поверхности снижаются в 1,2...1,9 раза по сравнению с образцами в состоянии поставки (рис. 3. а). Минимальные значения высотных параметров микрорельефа обработанной поверхности достигаются уже после одного прохода РКУП, а именно: S_a снижается в 1,7 раза, S_z – в 1,86 раза, S_q – в 1,57 раза по сравнению со значениями, достигнутыми при фрезеровании образцов в состоянии поставки. После двух проходов РКУП значения S_a , S_z и S_q немного увеличиваются по сравнению с однопроходными образцами, но все-таки они существенно ниже, чем достигнутые при обработке образцов в состоянии поставки. После двух проходов РКУП значения S_a и S_q аналогичны достигнутым при обработке однопроходных образцов, но параметр S_z лишь в 1,2 раза ниже, чем после обработки образцов в состоянии поставки.

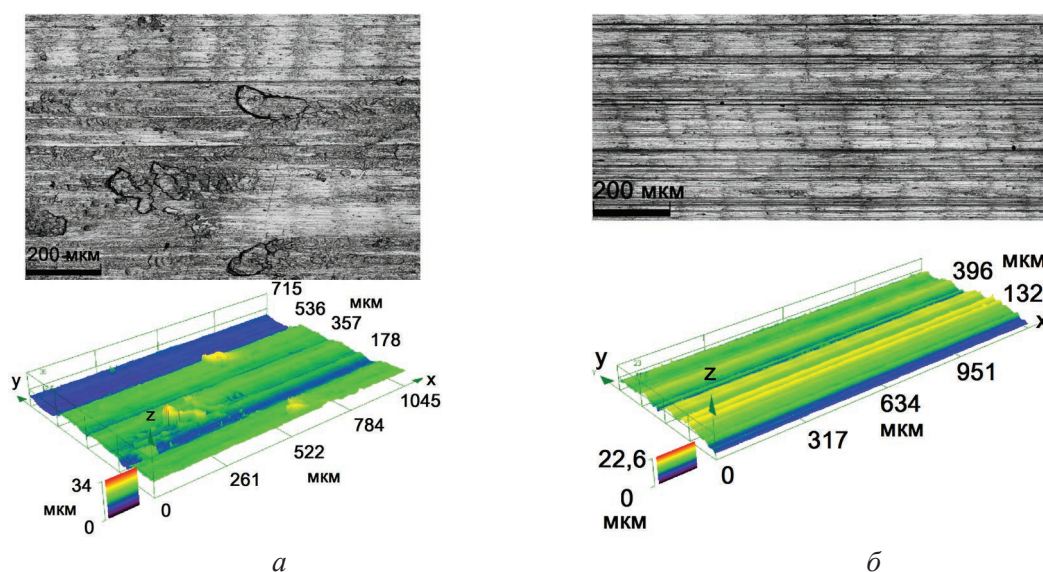
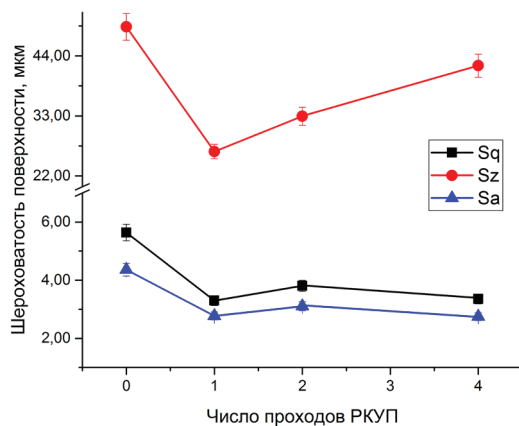
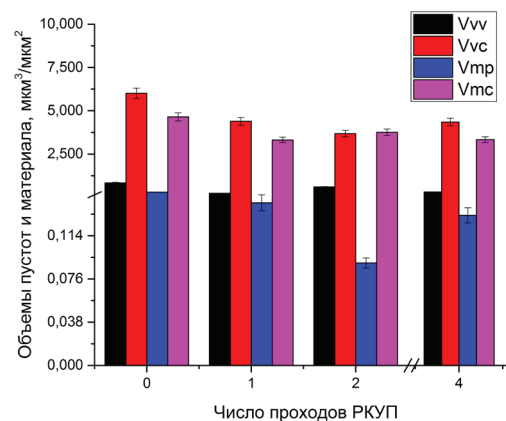


Рис. 2. Типичные изображения обработанной поверхности образцов в состоянии поставки (а) и после РКУП (б)

Fig. 2. Typical images of the machined surface of as-received (a) and ECAPed (b) samples



а



б

Рис. 3. Влияние числа проходов РКУП на параметры шероховатости поверхности (а), объем пустот и материала в расчете на единицу площади (б)

Fig. 3. Influence of the number of ECAP passes on parameters of surface roughness (а) and volume of voids and material per unit area (б)

Объемы пустот значительно снижаются как в области впадин (параметр V_{vv} уменьшается в 1,4...3,6 раза), так и в области ядра поверхности (параметр V_{vc} уменьшается в 1,4...1,6 раза) по сравнению с образцами в состоянии поставки (рис. 3, б и 4). Объем материала также снижается в области пиков (параметр V_{mp} уменьшается в 2,1...3,4 раза) и ядра поверхности (параметр V_{mc} уменьшается в 1,2...1,4 раза). Картина качественного изменения величины параметров V_{mp} , V_{mc} , V_{vv} , V_{vc} для образцов в состоянии поставки и после двух проходов РКУП представлена на рис. 4. Уменьшение величины параметров объема пустот и материала указывает на тот факт, что обработанная поверхность образцов со структурой, сформированной при РКУП, содержит меньшее количество выступов и впадин. Следовательно, такие образцы имеют более высокую контактную жесткость по сравнению с образцами в состоянии поставки.

На основе полученных экспериментальных результатов можно заключить, что РКУП является эффективным способом повышения качества механической обработки поверхности при фрезеровании алюминиевого сплава В95. В то же время для обеспечения оптимального соотношения качества обработки и высокой механической прочности достаточно двух проходов РКУП при выбранных условиях осуществления процесса структурообразования.

При лезвийной обработке основными факторами, ответственными за формирование микро-

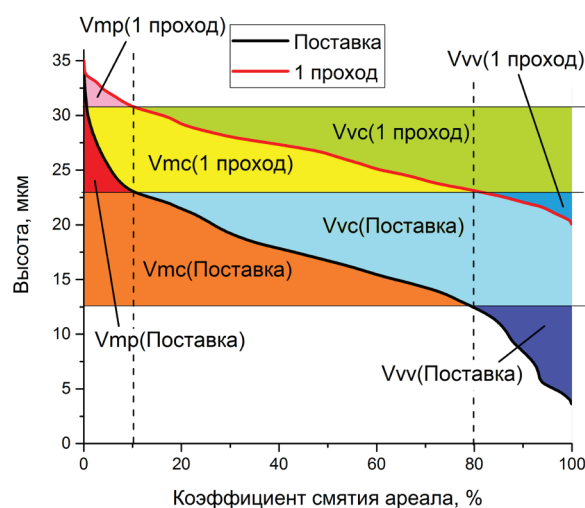


Рис. 4. Изменение объема пустот и материала на обработанной поверхности образцов в состоянии поставки и после двух проходов РКУП в зависимости от величины коэффициента смятия ареала

Fig. 4. Changes in the volume of voids and material on the machined surface of as-received and two pass ECAPed samples depending on the value of percent contact area

рельефа обработанной поверхности, являются режимы резания (скорость подачи инструмента, скорость резания, глубина и ширина фрезерования) и кинематическо-геометрические особенности процесса (направление подачи и траектория инструмента, геометрия режущего лезвия) [23–25]. Однако, как показано в настоящем исследовании, при неизменном значении указанных параметров обработки происходит

существенное изменение микрорельефа, которое является следствием изменения структуры и механических свойств материала.

Одной из физических причин формирования поверхностного микрорельефа является упруго-пластическая деформация приповерхностного слоя материала под действием режущего лезвия. В то же время известно, что деформационное поведение материалов с УМЗ-структурой существенно отличается от поведения материалов с КК-структурой, особенно в условиях интенсивного термомеханического воздействия. Возможно именно изменение в деформационном поведении и является главной причиной столь существенного изменения качества механической обработки УМЗ-материалов, однако в настоящее время данный вопрос исследован недостаточно. Следовательно, потребуется провести дополнительные исследования для более точного понимания процессов, приводящих к изменению микрорельефа поверхности при различных условиях механической обработки материалов с УМЗ-структурой. Для этого в дальнейшей работе методами металлографии и просвечивающей электронной микроскопии будут изучены особенности формирования микроструктуры в образцах с КК- и УМЗ-структурой, что позволит выяснить особенности формирования поверхностного микрорельефа и приповерхностной микроструктуры объемных УМЗ-материалов. Это позволит расширить область эффективного промышленного применения подобных высокоперспективных материалов.

Выводы

Сравнительный анализ качества обработки сплава В95 при фрезеровании по рекомендуемым режимам резания выполнен для образцов в состоянии поставки и после структурообразования методом РКУП. Равноканальное угловое прессование приводит к изменению микроструктуры и механических свойств алюминиевого сплава В95. Минимальный размер зерна ~50 нм достигнут после четырех проходов РКУП, а наилучшие механические свойства – после двух проходов. Условный предел текучести и предел прочности при растяжении повышаются на 25 и 28 % соответственно, а предел текучести при сжатии – на 15 % по сравнению с образцами в состоянии поставки.

Исходя из анализа микрогеометрии обработанной поверхности и механических свойств материала следует, что наиболее эффективным является второй проход РКУП, поскольку приводит к снижению высотных параметров шероховатости S_a , S_z , S_q в ~1,5 раза по сравнению с образцами в состоянии поставки и достижению наивысшей прочности как при растяжении, так и при сжатии.

Полученные результаты указывают на большой потенциал использования изделий из объемных УМЗ-материалов в промышленности за счет возможности сочетания в них высоких механических свойств и качества механической размерной обработки.

Список литературы

1. Dynamic ageing and the mechanical response of Al–Mg–Si alloy through equal channel angular pressing / M. Vaseghi, A. Karimi Taheri, S.I. Hong, H.S. Kim // *Materials and Design*. – 2010. – Vol. 31, iss. 9. – P. 4076–4082. – doi: 10.1016/j.matdes.2010.04.056.
2. Roven H.J., Liu M., Werenskiold J.C. Dynamic precipitation during severe plastic deformation of an Al–Mg–Si aluminium alloy // *Material Science and Engineering A*. – 2008. – Vol. 483. – P. 54–58. – doi: 10.1016/j.msea.2006.09.142.
3. Valiev R., Islamgaliev R., Alexandrov I. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // *Progress in Materials Science*. – 2000. – Vol. 45. – P. 103–189. – doi: 10.1016/S0079-6425(99)00007-9.
4. Filippov A.V., Filippova E.O. Creation and shaping of three-dimensional ultrafine-grain materials // *Russian Engineering Research*. – 2018. – Vol. 38. – P. 540–543. – doi: 10.3103/S1068798X18070067.
5. Ning J. Inverse determination of Johnson – Cook model constants of ultra-fine-grained titanium based on chip formation model and iterative gradient search // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 99, iss. 5–8. – P. 1131–1140. – doi: 10.1007/s00170-018-2508-6.
6. Chertovskikh V. Cuttability of UFG titanium BT1-0 obtained by ECAE // *Russian Engineering Research*. – 2007. – Vol. 27. – P. 260–264. – doi: 10.3103/S1068798X0705005X.
7. Huang Y., Morehead M. Study of machining-induced microstructure variations of nanostructured/ ultrafine-grained copper using XRD // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 2011. – Vol. 133. – P. 021007. – doi: 10.1115/1.4003105.
8. Surface integrity analysis when milling ultrafine-grained steels / A.R. Rodrigues, O. Balancin, J. Gallego, C.L.F. De Assis, H. Matsumoto, F.B. De Oliveira, S.R.D.S. Moreira, O.V. Da Silva Neto // *Materials Re-*



search. – 2012. – Vol. 15. – P. 125–130. – doi: 10.1590/S1516-14392011005000094.

9. Assis C.L.F. de, Jasinevicius R.G., Rodrigues A.R. Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 77. – P. 1155–1165. – doi: 10.1007/s00170-014-6503-2.

10. Оценка 2D параметров шероховатости и волнистости поверхности после обработки резанием сплава АМг2 с ультрамелкозернистой структурой. Ч. 1. Точение / А.В. Филиппов, С.Ю. Тарасов, Н.Н. Шамарин, О.А. Подгорных, Е.О. Филиппова // *СТИН*. – 2018. – № 7. – С. 20–24.

11. Machining characteristics of fine grained AZ91 Mg alloy processed by friction stir processing / G.V.V. Surya Kiran, K.H. Krishna, S. Sameer, M. Bhargavi, B.S. Kumar, G.M. Rao, Y. Naidubabu, R. Dumpala, B.R. Sunil // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2017. – Vol. 27. – P. 804–811. – doi: 10.1016/S1003-6326(17)60092-X.

12. Mechanical properties and machinability of 6061 aluminum alloy produced by equal-channel angular pressing / Y. Bayat Asl, M. Meratian, A. Emamikhah, R. Mokhtari Homami, A. Abbasi // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2015. – Vol. 229. – P. 1302–1313. – doi: 10.1177/0954405414535921.

13. Effect of equal channel angular pressing on aging treatment of Al-7075 alloy / M.H. Shaeri, M. Shaeri, M.T. Salehi, S.H. Seyyedein, M.R. Abutalebi // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2015. – Vol. 25. – P. 159–168. – doi: 10.1016/j.pnsc.2015.03.005.

14. Novel molding technique for ECAP process and effects on hardness of AA7075 / H. Kaya, M. Uçar, A. Cengiz, R. Samur, D. Özyürek, A. Çalışkan // *Mechanika*. – 2014. – Vol. 20. – P. 5–10. – doi: 10.5755/j01.mech.20.1.4207.

15. Microstructural and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by equal channel angular pressing / S.R. Kumar, K. Gudimetla, P. Venkatachalam, B. Ravisankar, K. Jayasankar // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – Vol. 533. – P. 50–54. – doi: 10.1016/j.msea.2011.11.031.

16. Kaya H., Uçar M. Fatigue behaviour and mechanical properties of ecap'ed and thixoformed aa7075 // *High Temperature Materials and Processes*. – 2014. – Vol. 33. – P. 277–285. – doi: 10.1515/htmp-2013-0074.

17. Effect of ECAP temperature on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy /

M.H. Shaeri, M. Shaeri, M. Ebrahimi, M.T. Salehi, S.H. Seyyedein // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2016. – Vol. 26. – P. 182–191. – doi: 10.1016/j.pnsc.2016.03.003.

18. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment / M.H. Shaeri, M.T. Salehi, S.H. Seyyedein, M.R. Abutalebi, J.K. Park // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 57. – P. 250–257. – doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.008.

19. Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing / Y.H. Zhao, X.Z. Liao, Z. Jin, R.Z. Valiev, Y.T. Zhu // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52. – P. 4589–4599. – doi: 10.1016/j.actamat.2004.06.017.

20. Grzesik W. Prediction of the functional performance of machined components based on surface topography: state of the art // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2016. – Vol. 25. – P. 4460–4468. – doi: 10.1007/s11665-016-2293-z.

21. Surface integrity in material removal processes: Recent advances / I.S. Jawahir, E. Brinksmeier, R. M'Saoubi, D.K. Aspinwall, J.C. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello, A.D. Jayal // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 60. – P. 603–626. – doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.002.

22. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy / S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, E.A. Kolubaev, T.A. Kalashnikova // *Tribology International*. – 2017. – Vol. 115. – P. 191–198. – doi: 10.1016/j.triboint.2017.05.039.

23. Žak K., Grzesik W. Metrological aspects of surface topographies produced by different machining operations regarding their potential functionality // *Metrology and Measurement Systems*. – 2017. – Vol. 24. – P. 325–335. – doi: 10.1515/mms-2017-0027.

24. Grzesik W., Rech J., Žak K. Characterization of surface textures generated on hardened steel parts in high-precision machining operations // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 78. – P. 2049–2056. – doi: 10.1007/s00170-015-6800-4.

25. Quantitative characterisation of surface texture / L. De Chiffre, P. Lonardo, H. Trumpold, D.A. Lucca, G. Goch, C.A. Brown, J. Raja, H.N. Hansen // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2000. – Vol. 49. – P. 635–652. – doi: 10.1016/S0007-8506(07)63458-1.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The Effect of Equal-Channel Angular Pressing on the Surface Quality of Aluminum Alloy 7075 after Milling

Andrey Filippov^{1, 2, a, *}, Sergei Tarasov^{1, 2, b}, Oleg Podgornykh^{1, c}, Nikolay Shamarin^{1, d},
Andrey Vorontsov^{2, e}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <http://orcid.org/0000-0003-0487-8382>, avf@ispms.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0003-0702-7639>, tsy@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7758-9242>, podgornysh.o.a@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>, serper89@gmail.com,

^e <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>, vav@ispms.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 October 2018

Revised: 31 October 2018

Accepted: 08 November 2018

Available online: 15 December 2018

Keywords:

Aluminum alloy

ECAP

Milling

Surface microgeometry

Funding

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant No. 17-79-10013. Metallographic studies were carried out within the framework of the Program of Basic Scientific Research of the State Academies of Sciences for 2013–2020, line III.23.

ABSTRACT

Introduction. The development of instrument and mechanical engineering is based on the achievement of high quality indicators and precision dimensional processing of modern structural materials. An important direction of improving the manufacturing technology of critical products is the use of materials with improved physical and mechanical properties and structure. Most often used methods of severe plastic deformation (SPD) are used to obtain such materials. As a result of SPD exposure, an ultrafine-grained (UFG) material structure is formed and its strength increases. The preservation of structural integrity and mechanical properties is an important task in the manufacture of parts from UFG materials that have a low temperature of the onset of recrystallization processes. During dimensional processing, the material is subject to significant deformation and thermal effects, which can affect its structural integrity and mechanical properties. Milling is one of the most common methods for producing high-quality parts from aluminum alloys. This method is preferred for dimensional processing of aluminum alloys with a UFG structure, since it is characterized by a local effect on thin surface layers of the material, in which no substantial heating of the entire volume of the workpiece occurs. The deformation of the surface layer of the material under the action of the cutting blade of the cutter forms the micro-relief of the surface of the part. The difference in the deformation behavior of coarse-grained (CG) and UFG materials can significantly affect the quality of mechanical processing of the latter. As a result, the known optimal machining conditions may not be applicable to UMP materials. **The purpose of the work:** to study the effect of structural changes in aluminum alloy 7075 on the quality of its machining during milling. In this work, samples of aluminum alloy 7075 in the as-delivered condition and after structure formation are investigated using modern metal-cutting tools and equipment, as well as recommended cutting conditions. **The methods of investigation** are mechanical tests for compression and tension, optical metallography, transmission electron microscopy, laser scanning microscopy. **Results and discussion.** Based on the obtained experimental results, it can be concluded that ECAP is an effective way to improve the quality of surface machining when milling 7075 aluminum alloy. At the same time, to ensure the optimum ratio of processing quality and high mechanical strength, two ECAP passages are sufficient, under the selected conditions for the process of structure formation. The obtained results indicate a great potential for the use of products from bulk UFG materials in industry due to the possibility of combining high mechanical properties and quality of dimensional machining in them. The data obtained can be applied in the design of technological processes for the machining of aluminum alloy 7075 with an ultrafine-grained structure under conditions of mass production engineering.

For citation: Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Podgornykh O.A., Shamarin N.N., Vorontsov A.V. The effect of equal-channel angular pressing on the surface quality of aluminum alloy 7075 after milling. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 96–106. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-96-106. (In Russian).

* Corresponding author

Filippov Andrey V., Ph.D. (Engineering), Assistant Professor
 Institute of Strength Physics and Materials Science
 of the Siberian Branch of the RAS
 2/4, pr. Akademicheskii
 Tomsk, 634055, Russian Federation
 Tel.: 8 (913) 128-72-07, e-mail: avf@ispms.ru

References

1. Vaseghi M., Karimi Taheri A., Hong S.I., Kim H.S. Dynamic ageing and the mechanical response of Al–Mg–Si alloy through equal channel angular pressing. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, iss. 9, pp. 4076–4082. doi: 10.1016/j.matdes.2010.04.056.
2. Roven H.J., Liu M., Werenskiold J.C. Dynamic precipitation during severe plastic deformation of an Al–Mg–Si aluminium alloy. *Material Science and Engineering A*, 2008, vol. 483, pp. 54–58. doi: 10.1016/j.msea.2006.09.142.
3. Valiev R., Islamgaliev R., Alexandrov I. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 2000, vol. 45, pp. 103–189. doi: 10.1016/S0079-6425(99)00007-9.
4. Filippov A.V., Filippova E.O. Creation and shaping of three-dimensional ultrafine-grain materials. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, pp. 540–543. doi: 10.3103/S1068798X18070067.
5. Ning J. Inverse determination of Johnson – Cook model constants of ultra-fine-grained titanium based on chip formation model and iterative gradient search. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, iss. 5–8, pp. 1131–1140. doi: 10.1007/s00170-018-2508-6.
6. Chertovskikh V. Cuttability of UFG titanium BT1-0 obtained by ECAP. *Russian Engineering Research*, 2007, vol. 27, pp. 260–264. doi: 10.3103/S1068798X0705005X.
7. Huang Y., Morehead M. Study of machining-induced microstructure variations of nanostructured/ultra-fine-grained copper using XRD. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2011, vol. 133, pp. 021007. doi: 10.1115/1.4003105.
8. Rodrigues A.R., Balancin O., Gallego J., Assis C.L.F. De, Matsumoto H., Oliveira F.B. De, Moreira S.R.D.S., Da Silva Neto O.V. Surface integrity analysis when milling ultrafine-grained steels. *Materials Research*, 2012, vol. 15, pp. 125–130. doi: 10.1590/S1516-14392011005000094.
9. Assis C.L.F. de, Jasinevicius R.G., Rodrigues A.R. Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, pp. 1155–1165. doi: 10.1007/s00170-014-6503-2.
10. Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Shamarin N.N., Podgornyykh O.A., Filippova E.O. Otsenka 2D parametrov sherokhovatosti i volnistosti poverkhnosti posle obrabotki rezaniem splava AMg2 s ul'tramelkozernistoi strukturoi. Ch. 1. Tochenie [Evaluation of 2D parameters of roughness and surface waviness after machining of AMg2 alloy with ultrafine-grained structure. Pt. 1. Turning]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2018, no. 7, pp. 20–24. (In Russian).
11. Surya Kiran G.V.V., Krishna K.H., Sameer S., Bhargavi M., Kumar B.S., Rao G.M., Naidubabu Y., Dumpala R., Sunil B.R. Machining characteristics of fine grained AZ91 Mg alloy processed by friction stir processing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, vol. 27, pp. 804–811. doi: 10.1016/S1003-6326(17)60092-X.
12. Bayat Asl Y., Meratian M., Emamikhah A., Mokhtari Homami R., Abbasi A. Mechanical properties and machinability of 6061 aluminum alloy produced by equal-channel angular pressing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, vol. 229, pp. 302–1313. doi: 10.1177/0954405414535921.
13. Shaeri M.H., Shaeri M., Salehi M.T., Seyyedein S.H., Abutalebi M.R. Effect of equal channel angular pressing on aging treatment of Al-7075 alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2015, vol. 25, pp. 159–168. doi: 10.1016/j.pnsc.2015.03.005.
14. Kaya H., Uçar M., Cengiz A., Samur R., Özyürek D., Çalışkan A. Novel molding technique for ECAP process and effects on hardness of AA7075. *Mechanika*, 2014, vol. 20, pp. 5–10. doi: 10.5755/j01.mech.20.1.4207.
15. Kumar S.R., Gudimetla K., Venkatachalam P., Ravisankar B., Jayasankar K. Microstructural and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A*, 2012, vol. 533, pp. 50–54. doi: 10.1016/j.msea.2011.11.031.
16. Kaya H., Uçar M. Fatigue behaviour and mechanical properties of ecap'ed and thixoformed aa7075. *High Temperature Materials and Processes*, 2014, vol. 33, pp. 277–285. doi: 10.1515/htmp-2013-0074.
17. Shaeri M.H., Shaeri M., Ebrahimi M., Salehi M.T., Seyyedein S.H. Effect of ECAP temperature on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2016, vol. 26, pp. 182–191. doi: 10.1016/j.pnsc.2016.03.003.
18. Shaeri M.H., Salehi M.T., Seyyedein S.H., Abutalebi M.R., Park J.K. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment. *Materials and Design*, 2014, vol. 57, pp. 250–257. doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.008.

19. Zhao Y.H., Liao X.Z., Jin Z., Valiev R.Z., Zhu Y.T. Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing. *Acta Materialia*, 2004, vol. 52, pp. 4589–4599. doi: 10.1016/j.actamat.2004.06.017.
20. Grzesik W. Prediction of the functional performance of machined components based on surface topography: state of the art. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, pp. 4460–4468. doi: 10.1007/s11665-016-2293-z.
21. Jawahir I.S., Brinksmeier E., M'Saoubi R., Aspinwall D.K., Outeiro J.C., Meyer D., Umbrello D., Jayal A.D. Surface integrity in material removal processes: recent advances. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2011, vol. 60, pp. 603–626. doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.002.
22. Tarasov S.Y., Filippov A.V., Kolubaev E.A., Kalashnikova T.A. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy. *Tribology International*, 2017, vol. 115, pp. 191–198. doi: 10.1016/j.triboint.2017.05.039.
23. Žak K., Grzesik W. Metrological aspects of surface topographies produced by different machining operations regarding their potential functionality. *Metrology and Measurement Systems*, 2017, vol. 24, pp. 325–335. doi: 10.1515/mms-2017-0027.
24. Grzesik W., Rech J., Žak K. Characterization of surface textures generated on hardened steel parts in high-precision machining operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 78, pp. 2049–2056. doi: 10.1007/s00170-015-6800-4.
25. Chiffre L. De, Lonardo P., Trumpold H., Lucca D.A., Goch G., Brown C.A., Raja J., Hansen H.N. Quantitative characterisation of surface texture. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2000, vol. 49, pp. 635–652. doi: 10.1016/S0007-8506(07)63458-1.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).