



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Оценка уровня упрочнения стружки из алюминиевого сплава, предназначенной для последующей обработки давлением

Юрий Логинов^{1, 2, a, *}, Николай Загиров^{3, b}, Евгений Иванов^{3, c}

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия

³ Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>,  j.n.loginov@urfu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0144-5063>,  nzagiroff@mail.ru

^c  <https://orcid.org/0000-0002-7585-6140>,  kafomd_1@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.014.8

История статьи:

Поступила: 30 декабря 2020

Рецензирование: 13 января 2021

Принята к печати: 06 февраля 2021

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Техногенные образования

Переработка стружки

Алюминиевый сплав

Метод конечных элементов

Пластическая деформация

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечено, что стружка является нежелательным видом металлического лома, поскольку обладает развитой поверхностью, что создает условия для более интенсивного взаимодействия с окружающей атмосферой. Тем самым создаются условия для окисления и газонасыщения, особенно при повышенных температурах, характерных для процессов переплава. Поэтому рассматривается процесс утилизации стружки, минуя стадию переплава. **Целью работы** является установление уровня наклепа стружки при обработке алюминиевых сплавов и прогноз ее влияния на последующий процесс переработки. **Методы исследования:** для оценки деформированного состояния применили метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе РАПИД-2D. Последовательность действий включала создание начальной формы очага деформации и конфигурации инструмента. Взаимное перемещение инструмента и деформируемого материала задано с помощью соответствующих граничных условий. Деформируемая среда – вязкопластический материал со степенным упрочнением, физико-механические свойства соответствуют алюминивно-магниево-сплав. **Результаты и обсуждение:** полученное решение показывает, что степень деформации сдвига в стружке может достигать величины больше 2. При этом наиболее высокий уровень деформации локализован со стороны выпуклой части стружки. Выполнено сравнение решения с полученными ранее другими авторами и показана их сходимость. В рассмотренном варианте решения различие в степени нагартовки стружки по ее толщине составляет 36 %. Рассмотрен вариант последовательности обработки заготовки вначале холодной деформацией, а затем резанием. **Область применения результатов работы** является разработка методов переработки техногенных образований. **Выводы.** В процессе резания пластическая деформация стружки достигает значительных величин. В работе установлено различие величин степени деформации сдвига по толщине стружки в зависимости от близости срезаемого слоя к поверхности режущего инструмента. Предложено это различие учитывать на последующих стадиях обработки стружки. Наличие отмеченной неоднородности механических свойств приводит к последствиям в виде неоднородного распределения температуры начала рекристаллизации при последующих операциях термической обработки или горячей деформационной обработки. Введен принцип аддитивности степени деформации, полученной металлом на стадии пластического формоизменения заготовки, и формоизменения собственно стружки.

Для цитирования: Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н., Иванов Е.В. Оценка уровня упрочнения стружки из алюминиевого сплава, предназначенной для последующей обработки давлением // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 45–55. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-45-55. (In Russian).

Введение

В процессах обработки давлением создается меньшее количество отходов по сравнению с обработкой резанием, а сами отходы менее дис-

персны, чем стружка, что позволяет осуществить их переплав с меньшими потерями. Однако не все процессы придания изделиям нужной формы могут быть переведены в область обработки давлением, и процессы резания, приводящие к образованию стружки, занимают значительный сегмент в машиностроении [1]. Стружка является второсортным видом металлического лома, поскольку обладает развитой поверхностью, что

*Адрес для переписки

Логинов Юрий Николаевич, д.т.н., профессор

Уральский федеральный университет

ул. Мира, 19,

620002, г. Екатеринбург, Россия

Тел.: 8 (343) 375-44-37, e-mail: j.n.loginov@urfu.ru

создает условия для более интенсивного ее взаимодействия с окружающей атмосферой. Если стружку переводить в состояние расплава, то на ее поверхности в результате нагрева возникают оксидные пленки либо происходит процесс газонасыщения металла. Эти обстоятельства заставили разработчиков пойти по пути утилизации стружки, минуя стадию переплава [2,3]. Для этого применяются методы обработки давлением, такие как компактирование в закрытом контейнере, прокатка-прессование, горячее прессование с последующей холодной обработкой продукта и др. [4]. Дополнительная трудность возникает при переплаве алюминиевой стружки. Если тяжелые цветные металлы или даже черные металлы можно восстановить в ходе плавки, применяя различные материалы-восстановители, то оксиды алюминия можно перевести в состояние металла только процессами электролиза. Отсюда стремление ограничиться только твердофазными процессами утилизации [5–7]. В жидкофазном процессе переплава алюминия на поверхности металла образуются пленки оксидов, плотность которых почти такая же, как плотность жидкой фазы, что делает трудным разделение этих фаз за счет сил тяжести. Твердую фазу не удастся отделить за счет всплывания на поверхность расплава или оседания на поверхности пода плавильных печей.

Стружка обладает определенной степенью нагартовки, что признается всеми исследовате-

лями. Эта степень нагартовки мало влияет на температуру плавления, но очень влияет на температуру рекристаллизации. Для некоторых металлов возможно понижение этой температуры до комнатной, что позволяет перевести металл в мягкое состояние. И, наоборот, фактор наличия упрочнения металла должен быть учтен в процессах компактирования стружки, он создает необходимость затрат дополнительной энергии.

В последнее время получили развитие исследования, направленные на определение свойств стружки в зависимости от условий резания [8], в том числе при обработке резанием различных алюминиевых сплавов [9], а также свойств получаемых из нее полуфабрикатов [10].

Цель работы состоит в установлении уровня степени деформации стружки при обработке алюминиевых сплавов резанием и прогноз ее влияния на последующий процесс переработки. Задачами исследования являются формулировка граничных условий процесса резания, полученные решения и адаптация сделанных выводов к процессу утилизации стружки.

Методика экспериментального исследования

Брикетирование стружки 2 из алюминиевого сплава осуществляли в пресс-форме (рис. 1, а), которая состоит из верхнего 1 и нижнего 4

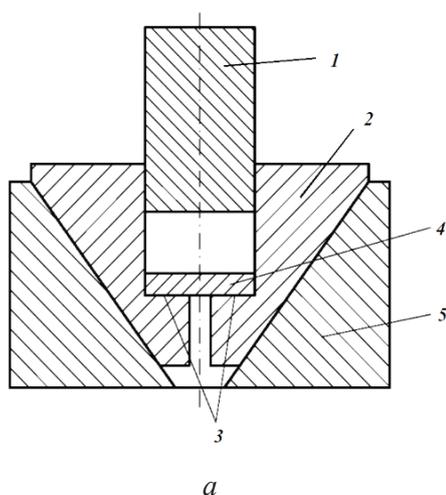


Рис. 1. Схема холодного прессования заготовки из стружки (а) и фото последующей горячей обработки на установке совмещенного процесса прокатки-прессования (б)

Fig. 1. Scheme of cold pressing of a billet made of chips (a) and a photo of subsequent hot processing on a combined rolling-pressing process unit (b)

пуансонов, разъемной матрицы 3 и обоймы 5 с наклонными контактирующими поверхностями.

В ходе экспериментов было установлено, что для обеспечения относительной интегральной плотности брикетов в 70...80 % давление брикетирования должно быть не ниже 80...100 МПа. Применение давлений такого уровня является обычным для компактирующих установок, его стараются не превышать из-за опасности повышенного износа рабочих поверхностей инструмента. Применительно к алюминиевым сплавам износ инструмента провоцируется тонкой защитной пленкой оксида алюминия, окружающей каждый фрагмент стружки. Твердость оксида алюминия весьма велика, кромки выступающих ее частей непрерывно царапают инструмент, вызывая износ. К этому обстоятельству добавляется опасность заалюминивания этих поверхностей.

Известно, что для алюминиевой стружки важным фактором при ее утилизации является развитие сдвиговых деформаций, позволяющих раздробить пленку оксида, окружающего каждый фрагмент металла, что позволяет консолидировать металл [11, 12]. Поэтому для дальнейшей обработки полученных брикетов применили установку совмещенной прокатки-прессования (СПП) (рис. 1, б). Валки установки подогревали до температуры 80...100 °С. Брикетывали в валки и деформировали с получением прутка конечным размером 7 и 9 мм, что соответствовало значениям коэффициентов вытяжки при прессовании 8 и 5. Исследования микроструктуры по-

лученных прутков привели к выводу о том, что в ряде случаев элементы стружки не образуют сплошного соединения, несмотря на комплекс созданных для этого условий: повышенной температуры, больших сдвиговых деформаций.

Причиной этому явлению могло быть то, что стружка после съема резцом обладает повышенными прочностными свойствами, что мешает процессу ее консолидации при холодном брикетировании. Низкий уровень уплотнения на этой стадии приводит к высокому уровню остаточной пористости после горячей деформации. Для оценки уровня упрочнения стружки предложено применить математическое моделирование процесса резания, что осуществлено в следующей части работы.

Методика вычислительного эксперимента

Для оценки деформированного состояния применили метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе РАПИД 2D (© Полищук Е.Г., Жиров Д.С.), описание и применение программного продукта приведено в книге [13]. Последовательность действий включала создание начальной формы очага деформации и конфигурации инструмента (рис. 2). Схема деформированного состояния – плоская. Тем самым выделяется только приповерхностный слой материала, который воспринимает напряжения резания. Физико-механические свойства деформируемого материала соответствуют сплаву АМг1

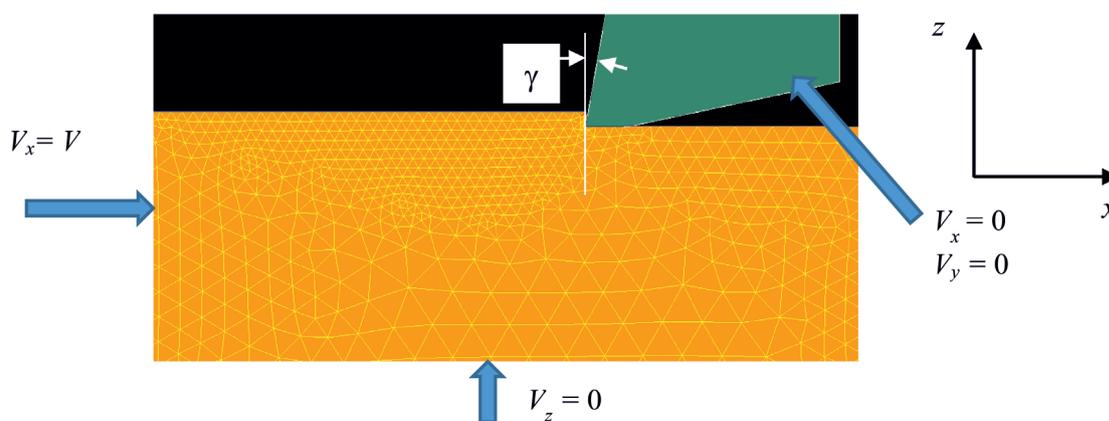


Рис. 2. Граничные условия при постановке задачи и система координат, γ – передний угол резца

Fig. 2. Boundary conditions in the formulation of the problem and the coordinate system, γ – tool rake angle

и взяты из библиотеки программного модуля. Наличие вязких свойств алюминиевых сплавов в холодном состоянии доказывалось в работах [14–16]. Резец представлен как абсолютно жесткое тело, поэтому характеристики материала, из которого он изготовлен, не учитывались.

Взаимное перемещение инструмента и деформируемого материала задано с помощью соответствующих граничных условий. Деформируемая среда – вязкопластическая со степенным упрочнением. Задана скорость взаимного смещения заготовки и резца на уровне 2 м/с. Обычно в процессах с высокими нормальными напряжениями на поверхности контакта задают закон трения по Зибелю, что реализовано в данной постановке. Показатель трения принят равным 0,1.

Программный комплекс РАПИД 2D позволяет оперировать размерными величинами на уровне миллиметра и выше, что для съема стружки не всегда характерно. Поэтому применили такой прием: размерные величины увеличили на порядок, имея в виду последующий переход после реализации расчетов к безразмерным величинам. Безразмерное представление информации делает ее более универсальной для применения.

Рассмотрен слой металла толщиной 25 мм. Толщина съема металла назначена на уровне 1 мм. Размеры выбраны условно, важно соотношение

между ними. Сетка конечных элементов в местах предполагаемых повышенных градиентов деформаций выполнена с меньшим шагом.

Деформационное упрочнение металла оценивают инвариантными величинами: либо степенью деформации ϵ (эквивалентная деформация), либо степенью деформации сдвига Λ при наличии связи между ними, $\Lambda = 1,732 \epsilon$.

Области равного уровня (рис. 3) показывают, что степень деформации сдвига в стружке может достигать значений выше 2 и это значение выше на выпуклой части витка. Это можно объяснить тем, что выпуклая часть стружки претерпевает большее удлинение относительно вогнутой поверхности.

Пластическая деформация при съеме стружки заканчивается в месте отделения ее от инструмента. Схема, представленная на рис. 3, позволяет оценить переход от неупрочненного состояния (от $\Lambda = 0$) к упрочненному, но градиент степени деформации в самой стружке не удастся отобразить адекватно. Поэтому на рис. 4 сдвинут диапазон отображения степени деформации сдвига до величин 2...2,8.

Максимальное значение степени деформации сдвига равно $\Lambda = 2,69$. Это значение можно соотнести с величиной относительного обжатия по сечению ϵ , например при волочении прутка, используя формулу

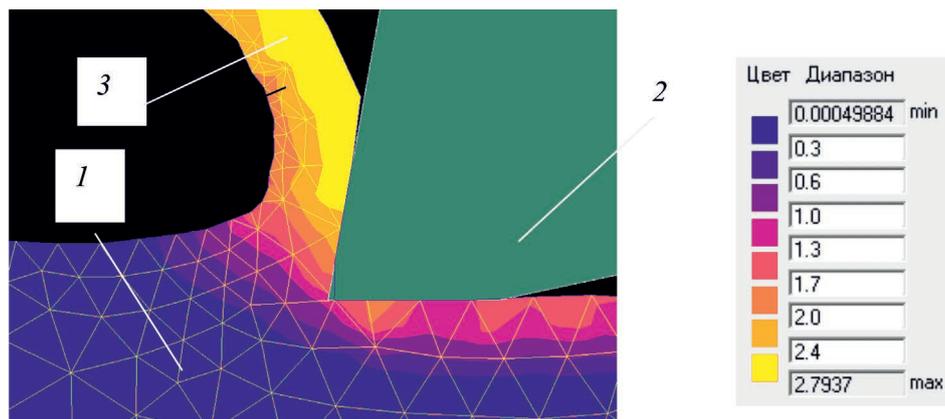


Рис. 3. Решение задачи отделения стружки при угле $\gamma = 10^\circ$ и условной глубине съема 1 мм:

1 – заготовка из сплава АlMg1; 2 – резец; 3 – стружка; справа цветовой ключ для степени деформации сдвига Λ

Fig. 3. Solution of the problem of separation of chips at an angle of $\gamma = 10^\circ$ and a nominal removal depth of 1 mm:

1 – workpiece from AlMg1 alloy; 2 – cutter; 3 – chips; on the right is a color key for the of shear strain Λ

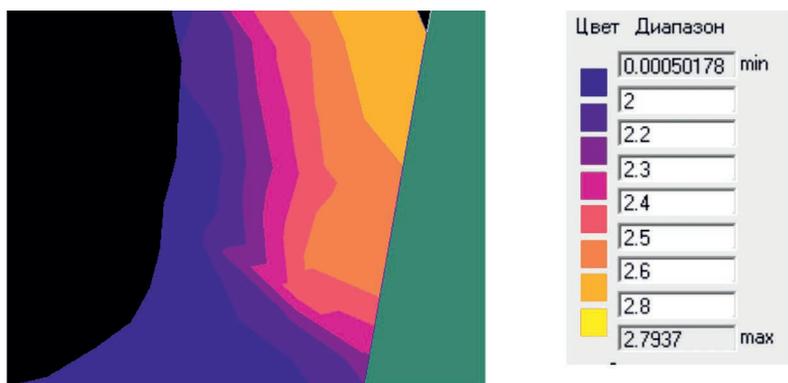


Рис. 4. Поле степени деформации сдвига Λ в месте отделения стружки от резца, справа цветовой ключ

Fig. 4. Field of the of shear strain Λ in the place of separation of the chips from the cutter, on the right with a color key

$$\begin{aligned} \Lambda &= 1,732 \cdot \ln(F_0 / F_1) = \\ &= 1,732 \cdot \ln[F_0 / (F_0 - \Delta F)] = \\ &= 1,732 \cdot \ln[1 / (1 - \varepsilon / 100)], \end{aligned} \quad (1)$$

где F_0 , F_1 , ΔF – начальная и конечная площадь поперечного сечения, а также ее изменение соответственно.

Отсюда

$$\varepsilon = 100 [1 - \exp(-\Lambda / 1,732)]. \quad (2)$$

При $\Lambda = 2,69$ получим значение $\varepsilon = 79\%$.

Для оценки численных значений распределения деформаций введена относительная координата x/δ , где x – текущая горизонтальная координата; δ – толщина стружки. График зависимости $\Lambda = f(x/\delta)$ представлен на рис. 5.

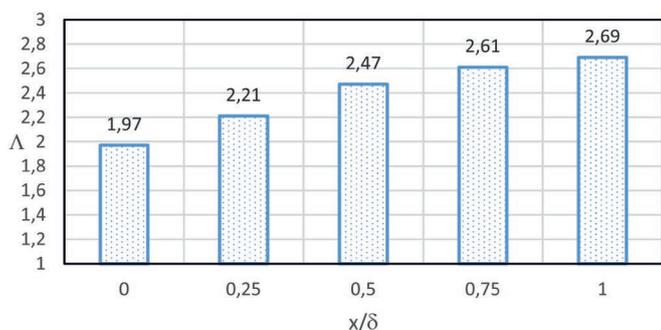


Рис. 5. Зависимость степени деформации сдвига от относительной координаты x/δ

Fig. 5. Dependence of the of shear strain on the relative coordinate x/δ

Здесь видно, что в данном случае различие в степени наклепа стружки по ее толщине составляет $100(2,69 - 1,97)/1,97 = 36\%$. Дальнейшие расчеты показали, что при увеличении толщины стружки эта разница будет увеличиваться, т. е. стружка становится все более неоднородным материалом.

Результаты и их обсуждение

Следует отметить, что качественно похожее решение задачи было получено в совместном исследовании США, республики Корея и Великобритании [17]. Задача решалась методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus/Explicit при реализации плоского деформированного состояния. Задача отделения стружки от заготовки не всегда решалась исследователями успешно, так как надо было допустить начало разрушения металла, чему мешает гипотеза неразрывности, принятая при построении системы уравнений теории пластичности. Однако это преодолено в статье [18], где показано значительное упрочнение металла стружки.

Большая степень деформации, локализованной в стружке, приводит к физическим явлениям, к которым относится измельчение структуры. В работе [19] показано, что происходит уменьшение размера зерна от величины около 60 мкм до 1...3 мкм, т. е. в 20...60 раз. Большой эффект достигается в слоях металла на выпуклой поверхности стружки, а меньший – на вогнутой поверхности, что соответствует полученному распределению деформации.

Отдельным фактором, который приходится учитывать при оценке деформированного состояния стружки, является учет степени деформации, достигнутой на предыдущих стадиях обработки. Дело в том, что детали часто подвергаются резанию после предварительной холодной деформации. Уровень этой деформации задан техническими условиями с целью использования в детали металла повышенной прочности.

Кроме того, для нагартованного металла характерен более высокий уровень хрупкости, что позволяет вместо сливной стружки получать сыпучую. Ее легче удалять из зоны резания как уже фрагментированный материал.

В механике пластической деформации действует гипотеза, вследствие которой пластические деформации, достигаемые в различных процессах, обладают свойством аддитивности, т. е. их можно складывать. Тогда результирующая степень деформации сдвига Λ_{Σ} , полученная стружкой, является суммой степеней деформации сдвига, накопленной заготовкой на предварительных стадиях ее обработки $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{i-1}$, и степени деформации сдвига, полученной при резании Λ_c :

$$\Lambda_{\Sigma} = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \dots + \Lambda_{i-1} + \Lambda_c. \quad (3)$$

Чистый алюминий редко выступает в качестве конструкционного материала. Обычно его рассматривают как функциональный материал и используют в качестве проводника электрического тока или элемента теплопередачи. Соответственно при изготовлении изделий типа проволоки или токопроводящих шин здесь редко возникает стружка, поскольку изделия получают методом волочения.

Термически неупрочняемые сплавы алюминия упрочняют холодной пластической деформацией. Термически упрочняемые сплавы проходят этапы закалки и последующего естественного или искусственного старения. При этом сохраняется возможность дополнительного упрочнения холодной или теплой пластической деформацией. Металл, прошедший эти стадии упрочнения, может обрабатываться резанием с образованием стружки. Степень деформации до разрушения зависит при этом от вида сплава и может превышать 90 % [20].

Дополнительная степень деформации сдвига Λ_{i-1} , которая была осуществлена применительно к металлу заготовки для операции резания, вызывает уменьшение температуры начала рекристаллизации. Это обстоятельство придется учесть при наличии операций термообработки или горячей деформационной обработки [21]. В том числе это понижение может оказаться неоднородным в объеме заготовки из-за неоднородностей самой стружки. В результате не исключено образование разнотекстурной структуры, что, в свою очередь, вызовет неоднородность распределения физико-механических свойств готового изделия.

Другой фактор, который приходится учитывать при оценке состояния стружки, касается

тепловых процессов, возникающих при обработке резанием. Сам процесс может осуществляться в различных условиях. Работа резания превращается в тепло, в результате стружка нагревается. С этим процессом конкурирует процесс ее охлаждения со стороны смазочно-охлаждающей жидкости, подаваемой в очаг резания. Вместе с тем при высоких скоростях резания тепло может не успевать отводиться, поэтому температура нагрева может превысить температуру рекристаллизации, что приведет к отжигу металла. Однако большое количество алюминиевых сплавов имеет очень высокую температуру рекристаллизации, что позволяет, в частности, получать нагартованный металл в таких операциях, как прессование. Таким образом, несмотря на то что прессование относят, как правило, к процессам горячей обработки, для алюминиевых сплавов оно часто является процессом холодной или в крайнем случае теплой обработки. В результате получается полуфабрикат, например прутки, который поступает на операцию резания с остаточным уровнем накопленной деформации. Здесь складывается такая же ситуация, как в случае обработки холоднодеформированного полуфабриката: для оценки наклепа образующейся стружки степени деформации сдвига должны быть просуммированы.

Парадокс заключается в том, что повышенная степень деформации в этом случае приводит к снижению температуры рекристаллизации материала стружки, т. е. процесс горячей деформации для нее может быть осуществлен при меньших температурах. Следует также отметить, что температура рекристаллизации для алюминиевой стружки зависит также от скорости деформации: при ее повышении температура рекристаллизации понижается. Поэтому, если есть стремление достичь менее прочного состояния алюминиевой стружки, то рекомендуемый во многих случаях процесс ее горячего брикетирования лучше проводить при больших скоростях нагружения, что противоречит концепции скоростного упрочнения, свойственной другим металлам. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение структурных последствий применения стружки как сырьевого материала для изготовления полуфабрикатов.

Заклучение

В процессе резания пластическая деформация стружки достигает значительных величин. В работе установлено различие величин степени деформации сдвига по толщине стружки в зависимости от близости срезаемого слоя к поверхности режущего инструмента. Предложено это различие учитывать на последующих стадиях обработки стружки. Наличие отмеченной неоднородности механических свойств приводит к последствиям в виде неоднородного распределения температуры начала рекристаллизации при последующих операциях термической обработки или горячей деформационной обработки. Введен принцип аддитивности степени деформации, полученной металлом на стадии пластического формоизменения заготовки, и формоизменения собственно стружки.

Список литературы

1. Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. The perfection of technology for recycling steel chips // Черные металлы. – 2018. – № 12. – С. 66–71.
2. Solid state recycling of aluminium AA6061 alloy chips by hot extrusion / M.I. Abd El Aal, M.A. Taha, A.I. Selmy, A.M. El-Gohry, H.S. Kim // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6, iss. 3. – P. 036525. – DOI: 10.1088/2053-1591/aaf6e7.
3. Effects of chip conditions on the solid state recycling of Ti-6Al-4V machining chips / E.W. Lui, S. Palanisamy, M.S. Dargusch, K. Xia // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 238. – P. 297–304. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.028.
4. Chiba R., Nakamura T., Kuroda M. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211 (11). – P. 1878–1887. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.06.010.
5. Сравнительный анализ технологий изготовления сварочной проволоки из эвтектического силумина с применением совмещенных методов обработки / Н.Н. Загиров, С.Б. Сидельников, Ю.Н. Логинов, Р.Е. Соколов // Цветные металлы. – 2017. – № 4. – С. 86–92. – DOI: 10.17580/tsm.2017.04.13.
6. Mounqomo J.B.M., Kouya D.N., Songmene V. Aluminium machining chips formation, treatment and recycling: a review // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 710. – P. 71–76. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.710.71.
7. Review of solid state recycling of aluminum chips / B. Wan, W. Chen, T. Lu, F. Liu, Z. Jiang, Z. Jiang,

M. Mao // Resources, Conservation and Recycling. – 2017. – Vol. 125. – P. 37–47. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004.

8. Buchkremer S., Klocke F., Lung D. Analytical study on the relationship between chip geometry and equivalent strain distribution on the free surface of chips in metal cutting // International Journal of Mechanical Sciences. – 2014. – Vol. 85. – P. 88–103. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.05.005.

9. Control and mechanism analysis of serrated chip formation in high speed machining of aluminum alloy 7050-t7451 / Q. Shi, Z. Hao, S. Wang, X. Fu, H. Wang // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 990. – P. 13–17. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.990.13.

10. Koch A., Wittke P., Walther F. Computed tomography-based characterization of the fatigue behavior and damage development of extruded profiles made from recycled AW6060 aluminum chips // Materials. – 2019. – Vol. 12 (15), P. 2372. – DOI: 10.3390/ma12152372.

11. Electrical resistance-based fatigue assessment and capability prediction of extrudates from recycled field-assisted sintered EN AW-6082 aluminium chips / A. Koch, M. Bonhage, M. Teschke, L. Luecker, B.-A. Behrens, F. Walther // Materials Characterization. – 2020. – Vol. 169. – P. 110644. – DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110644.

12. Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion / V. Güley, A. Güzel, A. Jäger, N. Ben Khalifa, A.E. Tekkaya, W.Z. Misiólek // Materials Science and Engineering A. – 2013. – Vol. 574. – P. 163–175. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.010.

13. Логинов Ю.Н. Решения технологических задач прессования с применением системы анализа процессов пластического деформирования «РАПИД 2D». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 78 с. – ISBN 978-5-321-01026-6.

14. Dynamic mechanical behavior of 6061 Al alloy at elevated temperature and different strain rates / X. Fan, T. Suo, Q. Sun, T. Wang // Acta Mechanica Sinica. – 2013. – Vol. 26, iss. 2. – P. 111–120. – DOI: 10.1016/S0894-9166(13)60011-7.

15. The effect of varying strain rates and stress states on the plasticity, damage, and fracture of aluminum alloys / M.T. Tucker, M.F. Horstemeyer, W.R. Whittington, K.N. Solanki, P.M. Gullett // Mechanics of Materials. – 2010. – Vol. 42. – P. 895–907. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2010.07.003.

16. Stress–strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates / Y. Chen, A.H. Clausen, O.S. Hopperstad, M. Langseth // International Journal of Solids and Structures. – 2009. – Vol. 46. – P. 3825–3835. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.07.013.

17. Zones of material separation in simulations of cutting / H. Pan, J. Liu, Y. Choi, C. Xu, Y. Bai, T. Atkins // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2016. – Vol. 115–116. – P. 262–279. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.06.019.

18. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations / T. Mabrouki, C. Courbon, Y. Zhang, J. Rech, D. Nélias, M. Asad // *Comptes Rendus Mécanique*. – 2016. – Vol. 344 (4). – P. 335–354. – DOI: 10.1016/j.crme.2016.02.003.

19. Orthogonal cutting simulation of OFHC copper using a new constitutive model considering the state

of stress and the microstructure effects / L.A. Denguir, J.C. Outeiro, G. Fromentin, V. Vignal, R. Besnard // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – P. 238–241. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.208.

20. *Колташников А.И.* Прокатка листов из легких сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с. – ISBN 978-5-321-01026-6.

21. Alternative technology for manufacturing rod–wire products from AK12 silumin / N.N. Zagirov, Y.N. Loginov, S.B. Sidel'nikov, E.V. Ivanov // *Metallurgist*. – 2018. – Vol. 62 (5–6). – P. 587–596. – DOI: 10.1007/s11015-018-0696-9.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Evaluation of the level of hardening of aluminum alloy chips intended for subsequent pressure treatment

Yuri Loginov^{1, 2, a, *}, Nikolay Zagirov^{3, b}, Evgeniy Ivanov^{3, c}

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

² M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskaya str., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation

³ Siberian Federal University, 79 Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>,  j.n.loginov@urfu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0144-5063>,  nzagiroff@mail.ru

^c  <https://orcid.org/0000-0002-7585-6140>,  kafomd_1@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 December 2020

Revised: 13 January 2021

Accepted: 06 February 2021

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Technogenic formations
Chip processing
Aluminum alloy
Finite element method
Plastic deformation

Funding

The work is performed with financial support of the Government of the Russian Federation, Act No. 211, Contract No. 02.A03.21.0006.

ABSTRACT

Introduction. It is noted that the chip is an undesirable type of metal scrap, because it has a developed surface, which creates conditions for more intense interaction with the surrounding atmosphere. This creates conditions for oxidation and gas saturation, especially at elevated temperatures typical of remelting processes. Therefore, the process of chip utilizing is considered, bypassing the remelting stage. The aim of the work is to establish the level of work hardening of chips during the processing of aluminum alloys and to predict its effect on the subsequent processing process. **Research methods:** to assess the deformed state, the finite element method was applied, implemented in the RAPID-2D software package. The sequence of actions included the creation of the initial shape of the deformation region and the configuration of the tool. The mutual displacement of the tool and the deformable material is specified using the corresponding boundary conditions. The deformable medium is a viscous-plastic material with power-law hardening, the physical and mechanical properties correspond to an aluminum-magnesium alloy. **Results and discussion:** the solution obtained shows that the degree of shear deformation in the chips can reach a value of more than 2. In this case, a higher level of deformation is localized on the side of the convex part of the chip. The comparison of the solution with those obtained earlier by other authors is carried out and its similarity is shown. In the considered solution, the difference in the degree of work-hardening of the chips along its thickness is 36 %. A variant of the sequence of processing the workpiece first by cold deformation, and then by cutting is considered. The field of application of the results of the work is the development of methods for the processing of technogenic formations. **Conclusions.** During the cutting process, the plastic deformation of the chips reaches significant values. In this paper, the difference in the degree of shear deformation in the chip thickness is established, depending on the proximity of the cut layer to the surface of the cutting tool. It is proposed to take this difference into account at the subsequent stages of chip processing. The presence of the marked inhomogeneity of mechanical properties leads to consequences in the form of an inhomogeneous distribution of the temperature of the beginning of recrystallization during subsequent operations of heat treatment or hot deformation treatment. The principle of additivity of the degree of deformation obtained by the metal at the stage of plastic shaping of the workpiece and the shaping of the chip itself is introduced.

For citation: Loginov Yu.N., Zagirov N.N., Ivanov E.V. Evaluation of the level of hardening of aluminum alloy chips intended for subsequent pressure treatment. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 45–55. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-45-55. (In Russian).

References

1. Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. The perfection of technology for recycling steel chips. *Chernye Metally*, 2018, vol. 12, pp. 66–71.

* Corresponding author

Loginov Yuri N., Ph.D. (Engineering), Full Professor
 Ural Federal University,
 19 Mira street,
 620002, Ekaterinburg, Russian Federation
 Tel.: 8 (343) 375-44-37, e-mail: j.n.loginov@urfu.ru

2. Abd El Aal M.I., Taha M.A., Selmy A.I., El-Gohry A.M., Kim H.S. Solid state recycling of aluminium AA6061 alloy chips by hot extrusion. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, iss. 3, p. 036525. DOI: 10.1088/2053-1591/aaf6e7.
3. Lui E.W., Palanisamy S., Dargusch M.S., Xia K. Effects of chip conditions on the solid state recycling of Ti-6Al-4V machining chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 238, pp. 297–304. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.028.
4. Chiba R., Nakamura T., Kuroda M. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211 (11), pp. 1878–1887. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.06.010.
5. Zagirov N.N., Sidelnikov S.B., Loginov Yu.N., Sokolov R.E. Sravnitel'nyi analiz tekhnologii izgotovleniya svarochnoi provoloki iz evtekticheskogo silumina s primeneniem sovmeshchennykh metodov obrabotki [Comparative analysis of technologies of welding wire production from eutectic silumin using combined processing methods]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2017, no. 4, pp. 86–92. DOI: 10.17580/tsm.2017.04.13.
6. Mougomo J.B.M., Kouya D.N., Songmene V. Aluminium machining chips formation, treatment and recycling: a review. *Engineering Materials*, 2016, vol. 710, pp. 71–76. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.710.71.
7. Wan B., Chen W., Lu T., Liu F., Jiang Z., Jiang Z., Mao M. Review of solid state recycling of aluminum chips. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 125, pp. 37–47. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004.
8. Buchkremer S., Klocke F., Lung D. Analytical study on the relationship between chip geometry and equivalent strain distribution on the free surface of chips in metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, vol. 85, pp. 88–103. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.05.005.
9. Shi Q., Hao Z., Wang S., Fu X., Wang H. Control and mechanism analysis of serrated chip formation in high speed machining of aluminum alloy 7050-t7451. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 990, pp. 13–17. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.990.13.
10. Koch A., Wittke P., Walther F. Computed tomography-based characterization of the fatigue behavior and damage development of extruded profiles made from recycled AW6060 aluminum chips. *Materials*, 2019, vol. 12 (15), p. 2372. DOI: 10.3390/ma12152372.
11. Koch A., Bonhage M., Teschke M., Luecker L., Behrens B.-A., Walther F. Electrical resistance-based fatigue assessment and capability prediction of extrudates from recycled field-assisted sintered EN AW-6082 aluminium chips. *Materials Characterization*, 2020, vol. 169, p. 110644. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110644.
12. Güley V., Güzel A., Jäger A., Ben Khalifa N., Tekkaya A.E., Misiolek W.Z. Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion. *Materials Science and Engineering A*, 2013, vol. 574, pp. 163–175. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.010.
13. Loginov Yu.N. *Resheniya tekhnologicheskikh zadach pressovaniya s primeneniem sistemy analiza protsessov plasticheskogo deformirovaniya "RAPID 2D"* [Solutions of technological problems of pressing using the system of analysis of plastic deformation processes "RAPID 2D"]. Ekaterinburg, UGTU-UI Publ., 2007. 78 p. ISBN 978-5-321-01026-6.
14. Fan X., Suo T., Sun Q., Wang T. Dynamic mechanical behavior of 6061 Al alloy at elevated temperature and different strain rates. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, vol. 26, iss. 2, pp. 111–120. DOI: 10.1016/S0894-9166(13)60011-7.
15. Tucker M.T., Horstemeyer M.F., Whittington W.R., Solanki K.N., Gullett P.M. The effect of varying strain rates and stress states on the plasticity, damage, and fracture of aluminum alloys. *Mechanics of Materials*, 2010, vol. 42, pp. 895–907. DOI: 10.1016/j.mechmat.2010.07.003.
16. Chen Y., Clausen A.H., Hopperstad O.S., Langseth M. Stress–strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, vol. 46, pp. 3825–3835. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.07.013.
17. Pan H., Liu J., Choi Y., Xu C., Bai Y., Atkins T. Zones of material separation in simulations of cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, vol. 115–116, pp. 262–279. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.06.019.
18. Mabrouki T., Courbon C., Zhang Y., Rech J., Nélías D., Asad M. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations. *Comptes Rendus Mécanique*, 2016, vol. 344 (4), pp. 335–354. DOI: 10.1016/j.crme.2016.02.003.



19. Denguir L.A., Outeiro J.C., Fromentin G., Vignal V., Besnard R. Orthogonal cutting simulation of OFHC copper using a new constitutive model considering the state of stress and the microstructure effects. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 238–241. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.208.

20. Kolpashnikov A.I. *Prokatka listov iz legkikh splavov* [Rolling of light alloy sheets]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 264 p.

21. Zagirov N.N., Loginov Y.N., Sidel'nikov S.B., Ivanov E.V. Alternative technology for manufacturing rod–wire products from AK12 silumin. *Metallurgist*, 2018, vol. 62 (5–6), pp. 587–596. DOI: 10.1007/s11015-018-0696-9.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 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/>).