

УДК 621.922

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СУБМИКРО- И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Симонова

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: NSymonova@gmail.com

Рассмотрены особенности процесса резания субмикроструктурных металлов, полученных методом интенсивной пластической деформации. Определена неоднозначность влияния условий механической обработки на показатели обрабатываемости субмикроструктурных металлов и на изменение их физико-механических свойств и структуры. Представлен анализ различных методов моделирования процесса механической обработки с точки зрения специфической дефектной структуры материалов. Анализ методов моделирования показал, что наряду с методом конечных элементов перспективным является метод молекулярной динамики и гибридный метод. Предложенные методы позволяют выйти за рамки идеальных монокристаллических структур и рассматривать поликристаллы, структуры с дефектами, предварительно обработанные структуры или модели деформированных заготовок, что важно для понимания физических процессов происходящих в зоне резания при обработке субмикроструктурных материалов.

Ключевые слова: субмикроструктурный, металлы, резание, обрабатываемость, моделирование, молекулярная динамика.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СУБМІКРО- ТА НАНОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

А. А. Симонова

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: NSymonova@gmail.com

Розглянуто особливості фізики процесу різання субмікроструктурних металів, отриманих методом інтенсивної пластичної деформації. Визначено неоднозначність впливу умов механічної обробки на показники оброблюваності субмікроструктурних металів та на зміну їх фізико-механічних властивостей та структури. Представлено аналіз різних методів моделювання процесу різання з точки зору специфічної дефектної структури матеріалів. Аналіз методів моделювання виявив, що поряд з методом скінчених елементів перспективним є метод молекулярної динаміки та гібридний метод. Запропоновані методи дозволяють вийти за рамки ідеальної монокристалічної структури та розглядати полікристали, структури з дефектами, попередньо оброблені структури або моделі деформованих заготовок, що важливо для розуміння фізичних процесів, які відбуваються у зоні різання при обробці субмікроструктурних матеріалів.

Ключові слова: субмікроструктурний, метали, різання, оброблюваність, моделювання, молекулярна динаміка.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Измельчение микроструктуры конструкционных сплавов до субмикроструктуры (СМК) и нанокристаллического (НК) состояния позволяет повысить их прочность, предел выносливости и износостойкость. Такие изменения в механических свойствах делают конструкционные сплавы с СМК и НК структурой перспективными для практического применения в авио-, судо-, автомобилестроении и медицине [1].

Получение готовых изделий из заготовок с СМК и НК структурой осуществляется с помощью механической обработки и имеет свои особенности, связанные с возникновением высоких температур в зоне резания, влияющих на интенсификацию процесса рекристаллизации и последующего роста зерна структуры и, как следствие резкое снижение физико-механических свойств материала заготовки.

Для прогнозирования изменения физико-механических свойств, вызванного термомеханическими явлениями в процессе резания можно использовать различные методы моделирования.

Целью работы является изучение различных методов моделирования с точки зрения их эффективного применения при моделировании процесса резания материалов с НК и СМК структурой, что позволит осуществлять обработку данного класса материалов с большей эффективностью при сохранении необходимых эксплуатационных характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для формирования НК и СМК в объемных образцах используют методы интенсивной пластической деформации (ИПД).

Экспериментальные данные показывают, что НК металлы, полученные методами интенсивной пластической деформации, отличаются существенной нестабильностью зеренной структуры. Наблюдаемый рост зерна может быть объяснен высокими внутренними напряжениями, источниками которых являются неравновесные границы зерен и искажение кристаллической решетки [2]. Так, в работах [3–4] было показано, что температура начала рекристаллизации в металлах с СМК структурой существенно ниже на $0,1-0,2 T_m$ (T_m – абсолютная температура плавления), чем после умеренной деформации. Результаты исследований температурной эволюции структуры и свойств НК металлов, полученных методом интенсивной пластической деформации, приведенные в работах [2, 5], показывают, что при нагреве материала происходят сложные структурные изменения, связанные с развитием процессов возврата, рекристаллизации и роста зерна.

Развитие процессов возврата зерен связано с перераспределением и аннигиляцией дислокаций на границах и в теле зерен, приводящих к уменьшению внутренних напряжений. Присутствуют также рекристаллизационные процессы, приводящие к росту зерен, последовательность этих процессов опреде-

ляется химическим составом и природой металла (энергией дефектов упаковки, типом кристаллической решетки), а также условиями интенсивной пластической деформации, которые определяют характер исходных наноструктур [6].

Причиной начала роста зерен в нанокристаллах при относительно низких температурах являются не только малый размер зерен, но, прежде всего, повышенная подвижность границ зерен, обусловленная низкой энергией активации зернограничной диффузии [7–8].

При осуществлении моделирования необходимо учитывать несовершенную структуру НК и СМК материалов, что может вызвать определенные трудности.

В целом параметры процесса механической обработки могут быть разделены на две категории:

1) технические аспекты: точность формы и размеры, шероховатость обработанной поверхности и свойства поверхностного слоя детали;

2) экономические аспекты, необходимые для управления: машинное время, стоимость обработки, производительность, доля брака и др.

На данном этапе развития моделирования НК и СМК материалов технические аспекты имеют преобладающее значение. Однако для выпуска конкурентоспособной продукции необходимо учитывать и экономические аспекты механической обработки изделий.

Процесс резания представляет собой сложный процесс пластической деформации, сопровождаемый интенсивным тепловыделением при значительных напряжениях в зоне контакта «инструмент – обрабатываемый материал» [9]. Поэтому моделирование процесса резания может вызвать ряд трудностей. Трудности в моделировании процессов механической обработки возникают из-за двух основных факторов:

1. Недостатка фундаментального понимания основных механизмов и взаимодействий режущего инструмента и обрабатываемого материала даже в наиболее простых случаях прямоугольного резания единственным прямолинейным лезвием при прямолинейном главном движении резания.

2. Различному назначению, большому количеству и сложности существующих процессов механической обработки.

К настоящему времени обрабатываемость НК и СМК материалов изучена еще относительно мало. В работах [10–11]. В качестве обрабатываемых материалов рассмотрены крупнокристаллические и СМК титан и медь. Условия резания: однозубая торцевая фреза из твердого сплава ВК8 для титана и ВК6 для меди; глубина резания $t = 0,5$ мм; скорость резания $V = 30 \dots 160$ м/мин; подача $S_z = 0,09 \dots 0,14$ мм/зуб. Исследователи отмечают улучшение обрабатываемости СМК титана при скорости резания менее 100 м/мин за счет снижения адгезионной составляющей коэффициента трения из-за уменьшения склонности к адгезионному взаимодействию СМК обрабатываемого и инструментального материалов системы. По этой же причине уменьшается коэффициент

продольной усадки стружки при скорости резания менее 100 м/мин. С дальнейшим повышением скорости резания различие между резанием крупнокристаллических и СМК материалов нивелируется. Коэффициент усадки в случае обработки меди СМК структуры в указанном скоростном диапазоне ниже, чем для крупнокристаллической, с той лишь особенностью, что вначале это различие весьма большое, но при V больше 90 м/мин оно стабилизируется, оставаясь не столь существенным.

Выявлено доминирующее влияние уровня температуры и продолжительности действия теплового источника на изменение исходных свойств НК и СМК материала, проявляющееся в увеличении исходных зерен и межзеренных границ. Следовательно, процесс резания НК и СМК материала необходимо строить так, чтобы сохранялись исходные свойства последнего. Резание СМК меди со скоростью $V = 30$ м/мин, подачей $S = 0,14$ мм/об и глубиной резания $t = 0,5$ мм без применения СОТС сопровождается ростом температуры до 500 К, развитием процессов возврата и рекристаллизации, в результате чего зерна имеют размер до 500 ± 50 нм при исходном значении 250 ± 50 нм. Дальнейшее повышение скорости резания до $V = 160$ м/мин, подачи до $S = 0,24$ мм/об приводит к росту температуры до 580 К. Происходит второй этап рекристаллизации – так называемой собирательной, в процессе которой зерна достигают размеров до 1 мкм за счет поглощения мелких зерен.

Косвенным показателем размера зерна в кристаллической структуре металла может служить микротвердость. В данных работах наблюдается повышение микротвердости у СМК образцов 2900 МПа у титана при 1800 МПа у исходной заготовки, и 1200 МПа при 600 МПа у исходной заготовки. Процесс обработки приводит к постепенному снижению величины микротвердости как в образцах СМК титана, так и меди.

Однако экспериментальные данные и аналитические модели не дают возможности воссоздать полномасштабную картину процессов, происходящих в структуре металла во время механической обработки СМК и НК металлов.

В данной работе внимание будет сконцентрировано на моделях процессов способных численно прогнозировать все контролируемые технические показатели процессов, например: типы и формы стружки, силы резания, температуры в зоне резания, износ и стойкость инструмента, шероховатость и работоспособность поверхности, а также точность детали. Тем не менее, основной интерес направлен на способность модели учитывать состояние структуры материала и прогнозировать ее изменения в процессе механической обработки.

Прогнозирующее моделирование процессов механической обработки, предназначенное для практического применения, может состоять из двух фаз.

Фаза 1: разработка моделей переменных процесса резания (внутренних параметров).

Фаза 2: разработка моделей показателей процесса резания.

На практиці може існувати і третій етап, пов'язаний з визначенням оптимальних умов різання (режимів різання) – фаза 3.

Звичайно вихідні дані для моделювання включають в себе режими різання, геометрію інструмента, параметри стружколомача, властивості оброблюваного і інструментального матеріала, динамічні параметри оброблюваної системи і др.

Сьогодні, за словами спеціалістів [12], результати повинні визначатися в два етапи:

1 етап – прогноуються (раховуються) деякі основні явища в процесі стружкоутворення: напруження, деформації. Температури, тертя, довжина контакту по передній поверхності, швидкість сходження стружки, коефіцієнт усадки і др.

2 етап – прогноуються (раховуються) один або декілька параметрів обробки: сили, момент і потужність різання; знос (стійкість) інструмента; форма стружки і її здатність ламатися; шорсткість обробленої поверхності або придатність поверхневого шару; точність деталі, відповідних розглядаємому випадку.

Необхідність використання моделей процесів механічної обробки обумовлена декількома причинами. Найбільш відомі з них наступні: проектування процесів; оптимізація процесів; управління процесами; імітація процесів; проектування обладнання.

Використання моделей для управління процесом різання може бути корисним для суттєвого зменшення розкиду результатів механічної обробки і, відповідно, попередження браку. Якщо б можна було б краще прогнозувати взаємодія входних і вихідних параметрів, то було б зрозуміло які необхідно встановлювати допуски входних параметрів для заданих допусків вихідних.

Головною метою досліджень в області обробки металів різанням є розробка аналітичних систем, що дозволяють нам прогнозувати показники процесу різання без проведення експериментів, що необхідно для призначення режимів різання (умов обробки). Однак процеси різання є дуже складними з великою кількістю взаємопов'язаних явищ (рис. 1).



Рисунок 1 – Факторы, оказывающие важное влияние на показатели процесса резания

Великий прогрес в області комп'ютерного обладнання і програмного забезпечення вказує на можливість прогнозування цих складних явищ за допомогою їх імітації методом кінцевих елементів. Оскільки процес утворення стружки пов'язаний з великими пластичними деформаціями і руйнуванням при високих температурах і швидкостях деформацій, дослідження процесу (стружкоутворення) повинні ґрунтуватися на теорії пластичності, доповненій аналізом температур. Оскільки теорія дає залежності між напруженнями і деформаціями, рішення яких виконується методом послідовного рахунку, процес стружкоутворення повинен моделюватися з самого його початку з виключенням от-

дельного випадку стаціонарного процесу утворення стружки.

Оброблюваний матеріал суттєво впливає на результати механічної обробки. В літературі по моделюванню найбільше увагу приділяється впливу механічних властивостей на процес стружкоутворення і сили різання. На практиці частіше важливим є розгляд впливу оброблюваного матеріала на пошкоджуваність інструмента і його стійкість і, отже, на вибір інструмента і режиму різання. В випадку обробки матеріалів з НК і СМК структурно важливим аспектом при моделюванні є постановка оберненої задачі – впливу основних параметрів механічної обробки на зміну властивостей оброблюваного матеріала.

Так як у розглядаваній групі матеріалів спостерігається низькотемпературна рекристалізація, то необхідно включити в модель деформації та температури. Однак величини деформацій, швидкості деформацій та температури, виникаючі при різанні на декілька порядків вище, ніж ті, що можуть бути отримані на сучасних стендах по випробуванню матеріалів.

Об'єм матеріалу, що піддається механічному впливу в процесі різання значно менше, ніж в інших процесах формоутворення. Розмір, форма та розподіл зерен та металургічних фаз суттєво впливають на характер стружкоутворення. Внаслідок цього, концепція неперервної пластичності може бути неадекватною і може бути необхідно розглянути мезопластичність. Малі розміри зони різання вимагають від нас усвідомлення розмірних ефектів [13] та впливу дислокацій [14]. В деяких випадках товщина среза порівнянна з шорсткотою режущої кромки, що пов'язано з недостатньою її гостротою, і це впливає на сили різання застої зони та ефектів «впашки» на заокруглій режущій кромці може бути значущим.

Генерація топографії поверхні та підповерхностної структури є важливою та тривалою темою досліджень в металоброботці.

Більш універсальне представлення матеріалу, яке дозволяє вийти за межі ідеальних монокристалічних структур, розглядати полікристали, структури з дефектами, попередньо оброблені або моделі деформованих заготовок дозволяє метод молекулярної динаміки. При такій малій товщині среза мікрогеометрія режущої кромки має велике вплив, тому велике вплив повинно бути уделено опису режущих кромки та явищ, що відбуваються в безпосередній близькості від них. Тільки тоді можуть бути зрозумілі суттєві відмінності в силах різання в підповерхностному шарі. Цей питання досліджується для ряду оброблюваних матеріалів [15–16]. Такі експерименти допоможуть обґрунтувати модель молекулярної динаміки.

Ефективність чисельних розрахунків при моделюванні на атомному рівні в багатьох випадках визначається повнотою опису взаємодії між атомами як множини малих частинок. Відокремлені частинки або визначений матеріал описується його хімічними елементами та їх координатами. Координати надають інформацію про розташування атомів, т. є. про структуру матеріалу, яка може бути встановлена, наприклад, для металів на основі відомого типу ґратки та її констант.

Оскільки зняття матеріалу при різанні є результатом відносного переміщення та взаємодії інструмента та заготовки, то необхідно, щоб модель включала, по крайней мере, їх поверхні в області контакту та достатню кількість матеріалу. При цьому інструмент звичайно розглядається як абсолютно жорстке тіло, що виконує вплив вершиною режущої клина

(лезвія) на заготовку (див. рис. 2), передаючи їй енергію, внаслідок чого зростає температура [17].

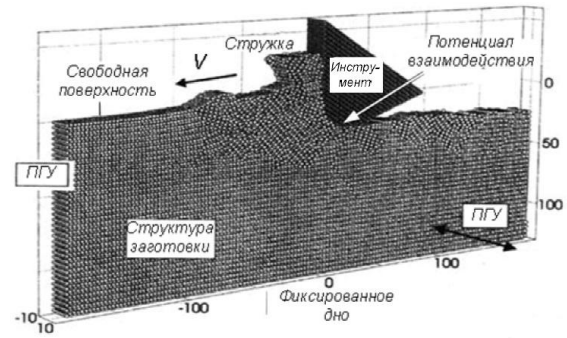


Рисунок 2 – Схема та граничні умови 3D моделі молекулярної динаміки процесу різання

Термостатическі атомні шари дозволяють контролювати їх температуру за рахунок відводу енергії в немоделювану область – всередину заготовки.

Обробка є масивним процесом деформації. Відносне переміщення може розглядатися як для моделі лезвія, так і для граничних атомів заготовки. Коли лезвіє, переміщуючись, контактує з 3D поверхнею заготовки, деформація вимушує матеріал накопичуватися на передній поверхні режущої клина, внаслідок чого формується стружка.

При використанні чисельного методу молекулярної динаміки визначаються координати атомів, що дозволяє візуалізувати миттєві положення та відслідковувати рухи атомів як окремих, так і їх груп.

Метод молекулярної динаміки є цікавим при моделюванні процесу механічної обробки НК та СМК металів. З допомогою молекулярної динаміки можуть бути вивчені не тільки основні технічні характеристики процесу різання, але й дефекти в кристалічній ґратці, такі як межі зерен, дислокації, а також аморфні структури, що в надлишку присутні в структурі металів, отриманих ІПД.

В роботі [12] запропоновано гібридний метод оснований на методі мікров'язкопластичності та спеціальному мікро методі кінцевих елементів. Область застосування гібридного методу представлена на рис. 3.

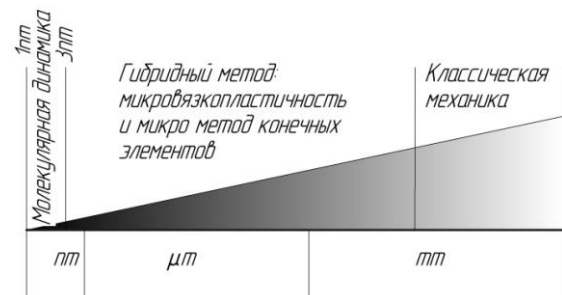


Рисунок 3 – Області застосування різних методів дослідження процесів різання

Гибридный метод используется для исследования около обработанной поверхности деталей, например в подслое глубиной меньше 3 нм, может быть применен метод молекулярной динамики, а в области с размерами в мм с успехом используются классические методы механики. Предлагаемый гибридный метод хорошо подходит для области с размерами от нм до мм.

Базовая концепция гибридного метода представлена на рис. 4. Сочетанием визиопластичности и конечно-элементного метода можно устранить или существенно уменьшить недостатки каждого из них. Команда конечно-элементного метода реализует это сочетание.

Гибридный метод может быть применен при термомеханических моделях, используют при изучении трения, а также при исследовании вопросов свободных границ.

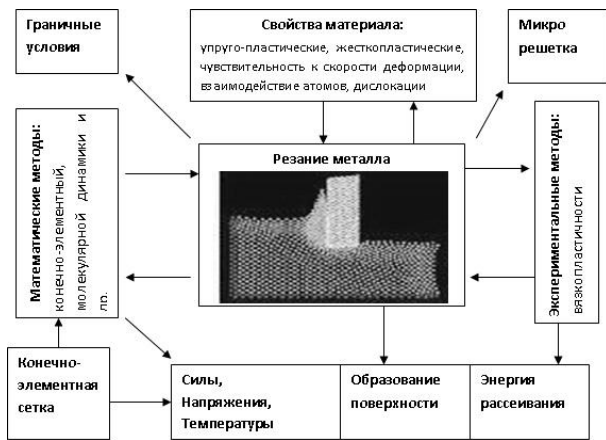


Рисунок 4 – Концепция гибридного метода

Соединение визиопластичности с конечно-элементным моделированием возможно с помощью двух подходов:

1. Использование деформированной сетки, полученной при использовании визиопластичности, как часть сетки метода конечных элементов. Сетка конечных элементов является выходными данными, полученными при визиопластичности. Скорости, рассчитанные в визиопластичности, используют как граничные условия в методе конечных элементов.

2. Непрямой метод, использующий полное моделирование методом конечных элементов с возвращением к измеренной геометрии и расчету скоростей в визиопластичности для параметров подходящих к теоретической модели.

ВЫВОДЫ. Высокие физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики материалов с НК и СМК структурой делают их перспективными для изготовления изделий в различных отраслях промышленности. Специфическая дефектная структура сформированная на этапе создания заготовки методами интенсивной пластической деформации вносит определенные трудности в процесс получения готового изделия, а также в создание моделей данных материалов. На ряду, с методом конечных элементов перспективным для исследования процесса механической обработки НК и СМК материалов являются метод молекуляр-

ной динамики и гибридный метод. Эти методы позволят изучить процессы, происходящие в кристаллической решетки в процессе стружкообразования, а также в приповерхностном слое заготовке. Такие модели помогут в понимании физики процесса резания и формирования свойств обрабатываемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valiev R.Z. Nanostructuring of Metals by Several Plastic Deformation for Advanced Properties // *Nature Materials*. – 2004. – Vol. 3. – PP. 511–516.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 271с.
3. Lian J., Valiev R.Z., Baudalet B. On the enhanced grain growth in ultra fine grain metals // *Acta metall. material*. – 1995. – Vol. 43. – PP. 661–668.
4. Амирханов И.М., Исламгалиев Р.К., Валиев Р.З. Релаксационные процессы и рост зерна при изотермическом отжиге ультрамелкозернистой меди, полученной интенсивной пластической деформацией // *ФММ*. – 1998. – Т. 86. № 4. – С. 99–105.
5. О термической нестабильности микрокристаллической структуры в однофазных металлических материалах / М.В. Дегтярев, А.В. Воронова, В.В. Губернаторов, Г.И. Чашухина // *ДАН*. – 2002. – Т. 386. № 2. – С. 180–183.
6. Humphrey F.J., Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. – Great Britain: Pergamon, 1996. – 497 p.
7. Перевезенцев В.Н., Пупышин А.С. Теория аномального роста зерна в субмикрокристаллических материалах, полученных методом интенсивной пластической деформации // *ФММ*. – 2000. – Т. 120. № 1. – С. 33–37.
8. Миронов С.Ю., Мышляев М.М. Анализ эволюции дислокационных границ в ходе холодной деформации микроструктуры титана // *ФТТ* – 2007. – Т. 49. № 5. – С.815–822.
9. Trent Ed. M., Wright P.K. Metal cutting. – USA: Butterworth–Heinemann, 2000. – 446 p.
10. Особенности механической обработки титана с субмикрокристаллической структурой / А.А. Симонова, А.Я. Мовшович, Н.В. Везузуб и др. // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. – 2009. – Вип. 6 (59), Ч. 1. – С. 70–75.
11. Симонова А.А. Макромеханика процесса резания субмикрокристаллических металлов // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2012. – Вип. 6 (77) – С. 67–69.
12. Luttervelt C.A., Childs T.H., Jawahir I.S., Klocke F. Present Sitation and Future Trends in Modelling of Machining Operations // *Annals of the CIRP*. – 1998. – Vol. 47/2. – PP. 587–626.
13. Backer W.R., Marshall E.R., Shaw M.C. The size effect in metal cutting // *Trans. ASME. Series B*. – 2002. – Vol. 74. – PP. 61–72.
14. Turkovich B.F. Dislocation theory of shear stress and strainrate in metal cutting // *Annals of the CIRP*. – 1997. – Vol. 46/2. – PP. 629–652.

15. Belak J., Boercker D.B., Stowers I.F. Simulation of Nanometer-Scale Deformation of Metallic and Ceramic Surfaces // *Mat. Res. Soc. Bul.* – 1993. – Vol. 69. – PP. 55–60.

16. Lucca D.A., Chou P., Hocken R.J. Effect of Tool Edge Geometry on the Nanometric Cutting of Ge //

Annals of the CIRP. – 1998. – Vol. 47/1. – PP. 217–231.

17. Davim P., Jackson J. M. Nano and micromachining ISTE ltd., 2009. – 212p.

THE MACHINING PROCESS SIMULATION OF THE SUBMICRO- AND NANOCRYSTALLINE MATERIALS

A. Symonova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: NSymonova@gmail.com

Purpose. The features of submicrocrystalline metal cutting process are discussed in the article. The bulk submicrocrystalline metals are obtained by severe plastic deformation. The finished products are produced by machining. This process has its own characteristics that are associated with the emergence of high temperatures in the cutting zone. This factor affects the intensification of the process of recrystallization and grain growth structure. As a result it is the sharp decline in physical and mechanical properties of the workpiece material. The aim is to study the various modeling methods in terms of their effective application in the simulation of this materials cutting process. **Methodology.** The input data for the simulation includes modes of cutting, tool geometry, chipbreaker parameters, properties of the processed material and the tool, the dynamic parameters of the processing system and others. **Results.** The analysis of the modeling different methods of the machining process, taking into account the specific defect structure of the materials are presented. It is showed that in addition to the finite element method is a promising method of molecular dynamics and hybrid method. These methods allow to consider the polycrystalline structures with defects, pre-processed structure or model of deformed workpiece. This is important for understanding the physical processes occurring in the cutting zone and processing forming properties of the submicrocrystalline materials. **Originality.** For the first time, we conducted a comparative analysis of the modeling methods of the machining process of the materials with nano- and submicrocrystalline structure taking into account the specific structure of the defective material. **Practical value.** The adequate model for predicting changes in the structure of materials after machining enables you to control performance properties of finished products. References 17, figures 4.

Key words: submicrocrystalline, metals, cutting, machinability, modeling, molecular, dynamics.

REFERENCES

1. Valiev, R.Z. (2004), "Nanostructuring of Metals by Several Plastic Deformation for Advanced Properties", *Nature Materials*, vol. 3, pp. 511–516.

2. Valiev, R.Z. and Aleksandrov, I.V. (2000), *Nanostrukturnye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformaciej* [Nanostructured materials produced by severe plastic deformation], Logos, Moscow, Russia.

3. Lian, J., Valiev, R.Z. and Baudalet, B. (1995), "On the enhanced grain growth in ultra fine grain metals", *Acta metall. material*, vol. 43, pp. 661–668.

4. Amirhanov, I.M., Islamgaliev, R.K. and Valiev, R.Z. (1998), "Relaxation processes and grain growth in isothermal annealing ultrafine copper produced by severe plastic deformation", *Fizika metallor i metallovednie*, vol. 86, no. 4, pp. 99–105.

5. Degtjarev, M.V., Voronova, A.V., Gubernatorov, V.V. and Chashhuhina, G.I. (2002), "On the thermal stability of the microcrystalline structure in single metallic materials", *Doklady akademii nauk*, vol. 386, no. 2, pp. 108–183.

6. Hymphrey, F.J. and Hatherly, M. (1996), *Recrystallization and related annealing phenomena*, Pergamon, London, Great Britain.

7. Perevezencev, V.N. and Pupyshin, A.S. (2000), "The theory of abnormal grain growth in submicrocrystalline materials produced by severe plastic deformation", *Fizika metallor i metallovednie*, vol. 120, no. 1, pp. 33–37.

8. Mironov, S.Ju. and Myshljaev, M.M. (2007), "Analysis of the evolution of dislocation boundaries

during cold deformation microstructure of titanium", *Fizika tverdogo tela*, vol. 49, no. 5, pp. 815–822.

9. Trent, Ed. M. and Wright, P.K. (2000), *Metal cutting*, Butterworth-Heinemann, USA.

10. Symonova, A.A., Movshovich, A.Ja., Verezub, N.V. at all (2009), "The features machining of submicrocrystalline titanium", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 6, no. 59, pp. 70–75.

11. Symonova, A.A. (2012), "Macromechanics process of cutting metal submicrocrystalline", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 6, no. 77, pp. 67–69.

12. Lutervelt, C.A., Childs, T.H., Jawahir, I.S. and Klocke, F. (1998), "Present Sitation and Future Trends in Modelling of Machining Operations", *Annals of the CIRP*, vol. 47, no. 2, pp. 587–626.

13. Backer, W.R., Marshall, E.R. and Shaw, M.C. (2002), "The size effect in metal cutting", *Trans. ASME. Series B*, vol. 74, pp. 61–72.

14. Turkovich, B.F. (1997), "Dislocation theory of shear stress and strain rate in metal cutting", *Annals of the CIRP*, vol. 46, no. 2, pp. 629–652.

15. Belak, J., Boercker, D.B. and Stowers, I.F. (1993), "Simulation of Nanometer-Scale Deformation of Metallic and Ceramic Surfaces", *Mat. Res. Soc. Bul.*, vol. 69, pp. 55–60.

16. Lucca, D.A., Chou, P. and Hocken, R.J. (1998), "Effect of Tool Edge Geometry on the Nanometric Cutting of Ge", *Annals of the CIRP*, vol. 47, no. 1, pp. 217–231.

17. Davim, P., Jackson, J. M. (2009), *Nano and micromachining*, ISTE ltd., USA.

Стаття надійшла 30.09.2015.