

Исследование влияния технологических параметров процесса высокоскоростного фрезерования на качество обработки закаленных сталей

Нац. техн. ун-т «Харьковский политехнический институт»

Проведены всесторонние исследования технологических параметров процесса резания закаленных сталей на базе метода конечных элементов и экспериментального подхода. Результаты компьютерного моделирования применялись для прогнозирования распределения температур, напряжений в процессе резания и характера стружкообразования, также для оценки поверхностной целостности и твердости обработанного материала. Экспериментальный подход применялся для оценки шероховатости, поверхностной микротвердости и характера нарушенного слоя обработанного материала при разных режимах обработки.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, закалённая сталь, моделирование, метод конечных элементов, эксперимент, качество, твердость, шероховатость, нарушенный слой.

Ранее мы отмечали, что в процессе высокоскоростного фрезерования основными переменными процесса являются скорость резания, глубина среза и поперечная подача [1]. В условиях малых глубин среза металла при высоких скоростях резания актуальным становится вопрос нецелесообразности применения традиционных знаний о процессе фрезерования при назначении режимов резания, так как это может стать причиной быстрого износа инструмента, отклонения его формы, поломки, ухудшения поверхностной целостности обработанного материала и снижения производительности. Из обзора работ зарубежных авторов следует [2,3], что разработке новых технологий обработки материалов уделяется огромное внимание, однако на сегодняшний день такие технологии еще полностью не изучены, в связи с чем, существующий опыт и понимания процессов, которые протекают в зоне ВСП, ограничены. Из-за отсутствия подробных рекомендаций производителей и разработанных методик назначения адекватных режимов обработки, актуальной становится задача поиска технологических решений, способных ограничить применения метода «проб и ошибок», который на практика далеко не всегда обеспечивает положительный результат, но практически всегда является экономически нецелесообразным. Из-за высокой стоимости инструмента для ВСО, больших температур в зоне резания и необходимости применения специального оборудования к нововведениям в процессе обработки относятся довольно консервативно.

Таким образом, систематические знания и представление о влиянии технологических параметров процесса высокоскоростного резания на качество обработанного материала и производительность инструмента является необходимым условием для инженеров, что даст возможность увеличить срок службы инструмента и способствует назначению адекватных режимов обработки.

Целью данной статьи является всестороннее исследование влияния технологических параметров процесса обработки закаленных сталей на базе метода

конечных элементов и экспериментального подхода. Так как закалённые стали имеют промежуточное состояние между пластичными и хрупкими металлами, причем закаленные стали высокой твердости являются типичными хрупкими материалами, поэтому в процессе шлифования закалённых сталей происходит «вырывание» зерен материала из кристаллической решетки, а процесс ВСФ «высвобождает» свойства пластичности у хрупких материалов.

Применения МКЭ позволяет при исследовании комплексно учитывать геометрию инструмента, термомеханические свойства материала, контактные схемы обработки и режимы резания, что делает этот подход наиболее перспективным в сравнении с известными на сегодняшний день. Исследование 2D моделей позволяет конкретно определить минимальную толщину стружки, зато работа с 3D моделями дает возможность мониторинга поверхности обработанной детали, характера стружкообразования и стойкости инструмента.

Наши исследования в представляемой работе направлены на обеспечение качества изготовления сложных поверхностей из труднообрабатываемых материалов, в частности представителя перлитного класса – стали конструкционной высококачественной хромоалюминиевой с молибденом – 38Х2МЮА.

Из технических характеристик стали известно, что минимальная толщина стружки должна составлять (25÷40)% относительно радиуса режущей кромки инструмента. Что является приоритетным при назначении подачи на зуб во избежание пропашки материала.

Результаты проведенного ранее анализа позволили предположить, что с увеличением скорости резания качество поверхности, а именно её фактическая шероховатость, улучшается. Следует отметить, что в зависимости от обрабатываемого материала диапазон скоростей резания варьируется. Однако в связи с тем, что существует большое число марок сталей (различающихся по химическому составу, структуре, физическим и механическим свойствам) диапазон высоких скоростей резания для каждого вида стали терпит изменения, а назначение режимов обработки требует экспериментальных исследований. Для минимизации экспериментальных исследований, получения представления о физике процесса резания и для назначения оптимальных режимов резания и их коррекции на этапе планирования ТП изготовления поверхностей мы воспользовались имитационным моделированием процесса высокоскоростного резания методом конечных элементов в пакете DEFORM-3D.

Ранее нами было отмечено, что предельные (максимальные) режимы резания, где можно назначать режимы обработки, находятся между пиком энергии и точкой, которая соответствует моменту сброса энергии, которая затрачивается на процесс резания [4]. Установили, что чем меньше энергии в процессе обработки потребляется на начальный процесс резания и чем быстрее достигается энергетический пик процесса, тем стабильней процесс дальнейшего разрушения и пластического течения материала, что на практике обуславливает лучшее качество обработанного образца. Также в ходе имитационного моделирования определили, что скачкообразный характер деформации материала при моделировании ВСФ объясняется дискретным перемещением дислокаций и чем стабильней этот процесс, тем лучше условия для

формирования стабильного нарушенного слоя обработанной поверхности. Исследование процессов протекающих в зоне резания позволило впервые установить, что при высокоскоростном резании вихревые потоки дислокаций материалов образуются на этапе вдавливания и располагаются за режущим клином фрезы и отвечают за формирование качественных изменений нарушенно-деформационного слоя материала и, возможно, наноструктур, а при обычных режимах резания вихревые потоки опережают режущий клин. Эти потоки отвечают за процесс наростообразования. В ходе моделирования мы подтвердили, что с увеличением скорости резания температура в зоне обработки уменьшается (рис. 1)

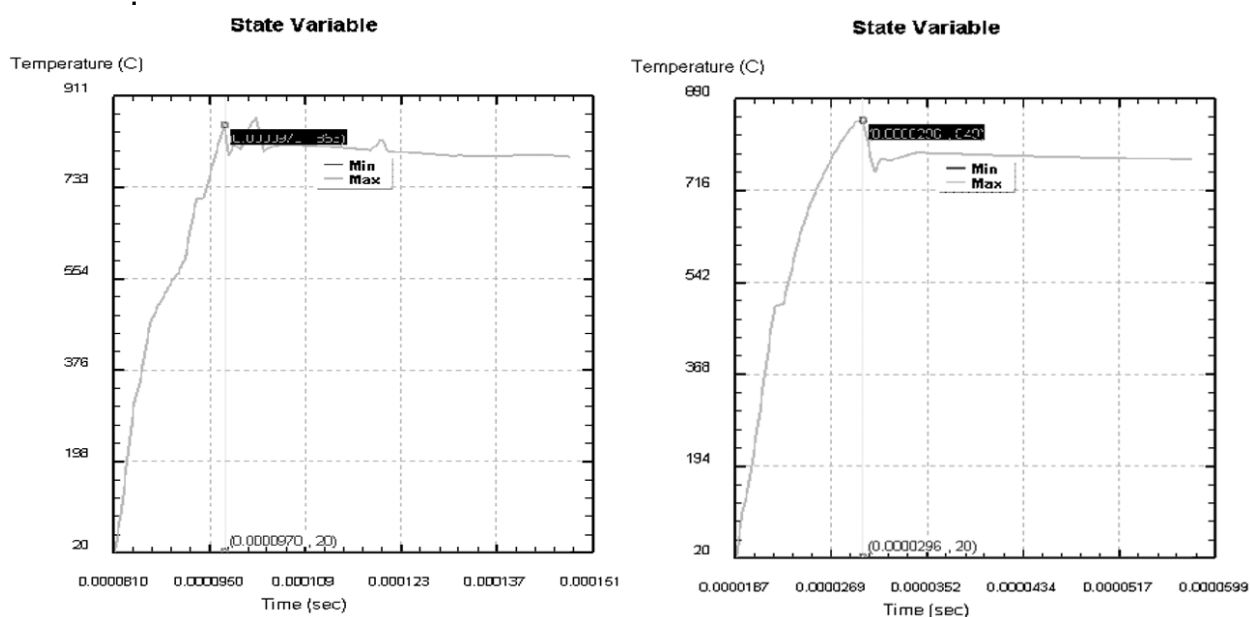


Рис. 1. График зависимости изменения максимальных температур в зоне резания от времени работы фрезы при 15000 об/мин (а) и 21000 об/мин (б)

Ранее мы уже отмечали, что на стадии врезания в зоне ВСФ протекают нелинейные процессы [5]. Исследования процессов в среде 2D позволило утверждать, что изменение напряжений в материале имеет волновой характер, с которым коррелируют все остальные параметры процесса резания, но каждый из параметров имеет свой временной сдвиг относительно волнового фронта напряжений. Причем сдвиг волновых фронтов растет с увеличением скорости резания и это является основным признаком отличия высокоскоростного фрезерования от традиционного [4]. Исследования в среде 3D показали, что эти процессы стабилизируются с увеличением скорости резания (рис.2-3). Кроме того, подтвердили, ранее высказанное предположение, что с увеличением скорости резания улучшается общая картина обработанной поверхности (рис. 4), в частности, остаточная шероховатость уменьшается (рис. 5). Такой результат позволяет заранее прогнозировать качество поверхностного слоя при назначении режимов резания.

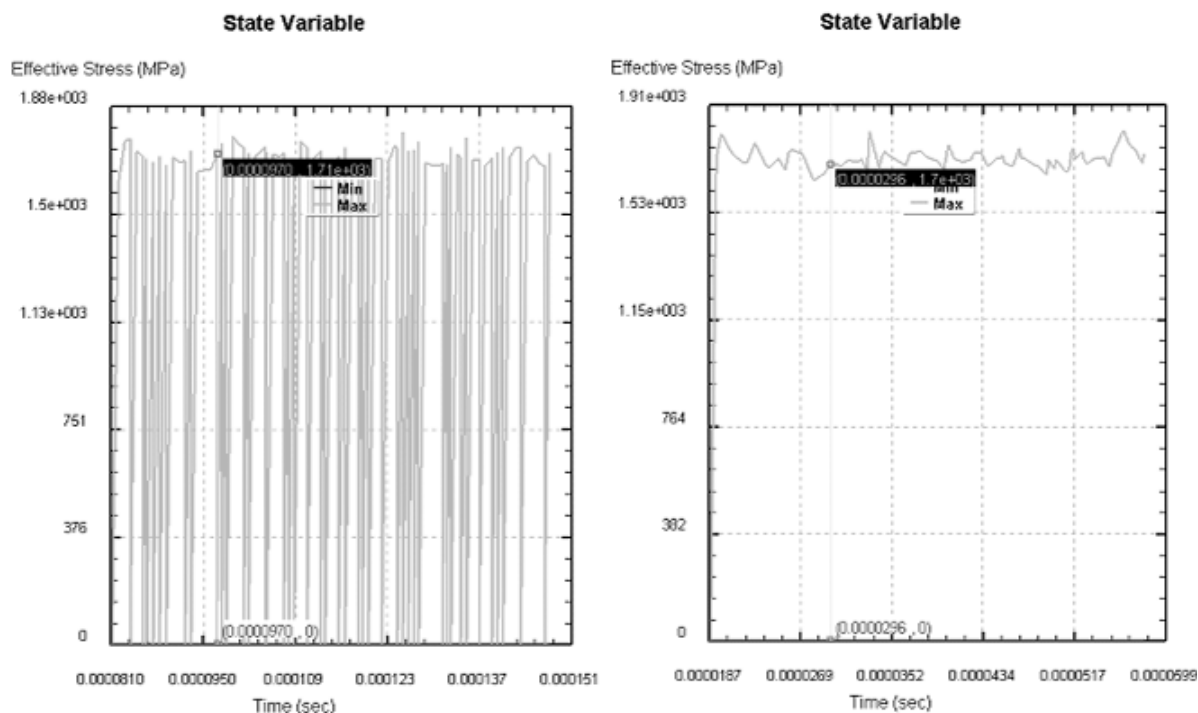


Рис. 2. График зависимости изменения напряжений, возникающих в процессе резания от времени работы фрезы при 15000 об/мин (а) и 21000 об/мин (б)

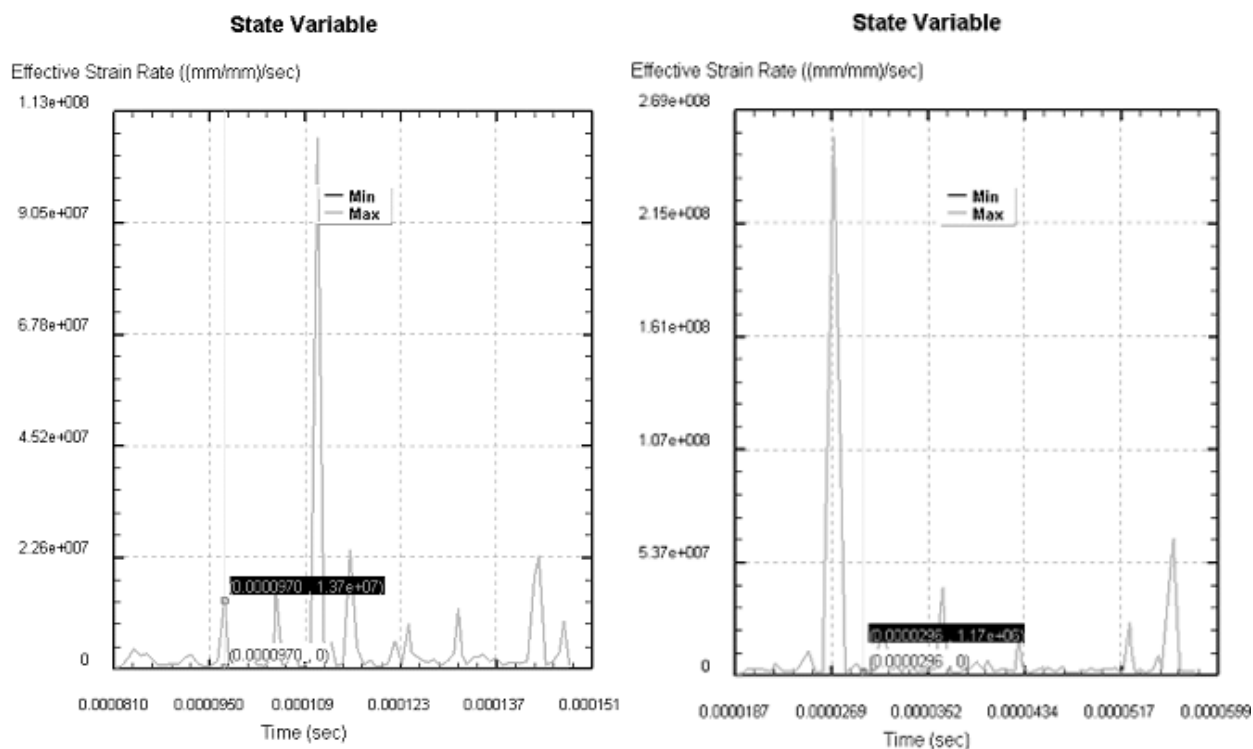


Рис. 3. График зависимости изменения скорости деформации материала в процессе резания от времени работы фрезы при 15000 об/мин (а) и 21000 об/мин (б)

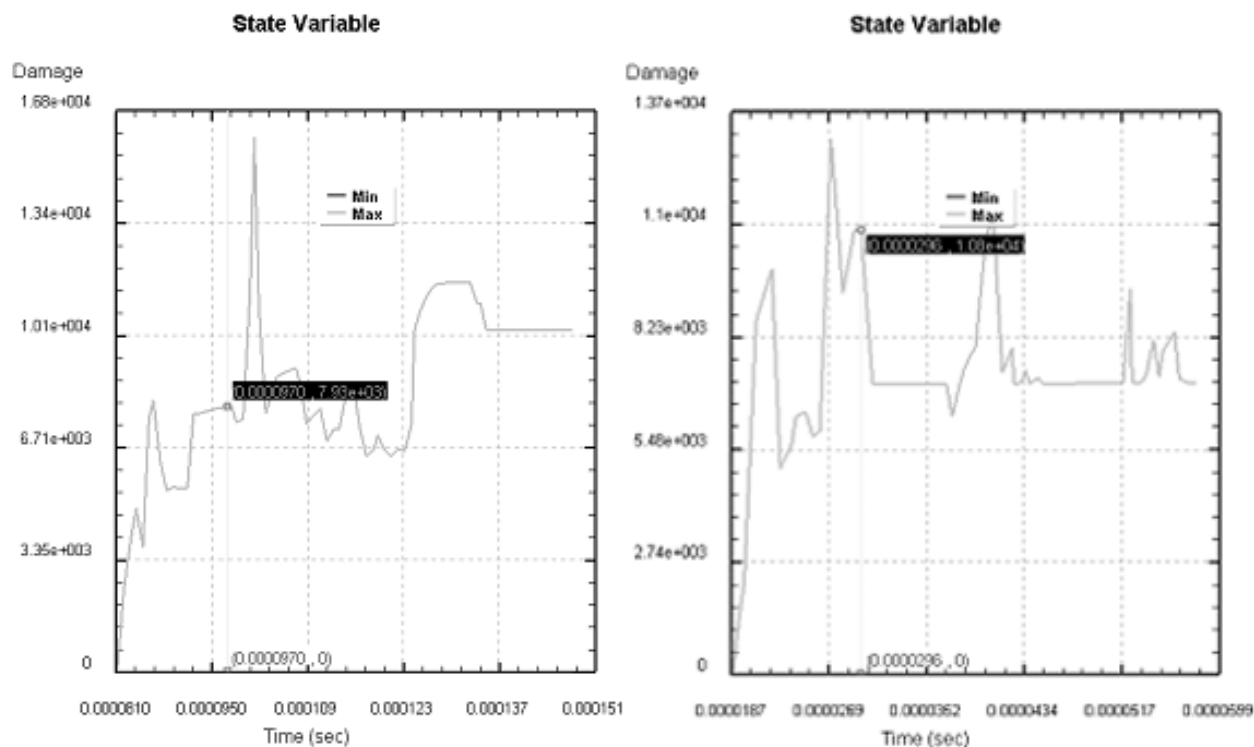


Рис. 4. График зависимости изменения количества дефектов обработанной поверхности от времени работы фрезы при 15000 об/мин (а) и 21000 об/мин (б)

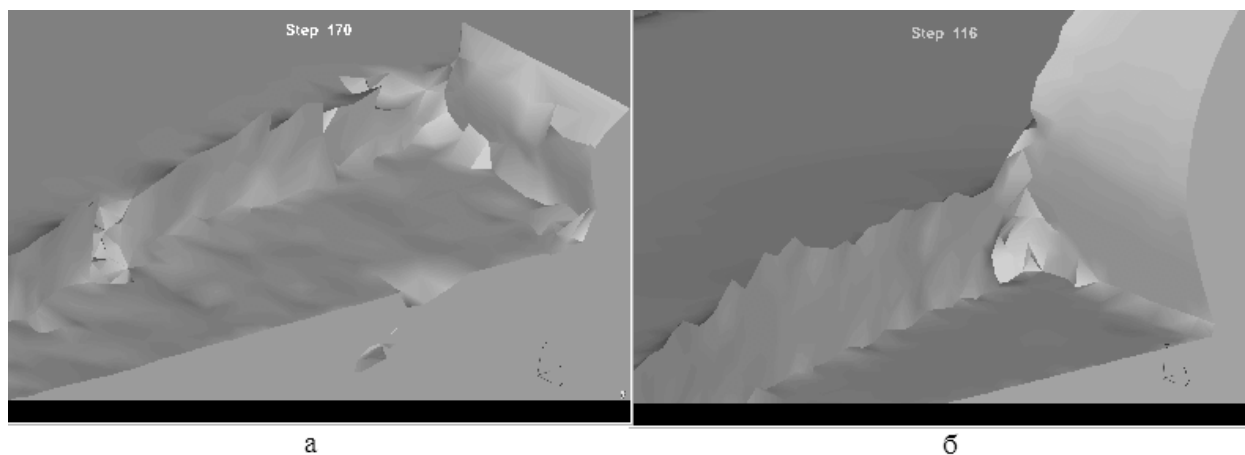


Рис. 5. Моделирование обработанной поверхности после ВСФ с различными скоростями резания и фиксированной подачи на зуб: а) при 15000 об/мин, б) при 21000 об/мин

Еще одним значимым достижением стало понимание процесса стружкообразования. Мы подтвердили ранее высказанное предположение, что с увеличением эффективной скорости резания при фиксированном значении подачи на зуб стружка приобретает сливной характер (рис. 6). Кроме того установили, что с ростом скорости резания максимальные температуры процесса распределяются в стружке, следовательно на поверхности предварительно закаленных материалов не происходит отпуск. Моделирование процесса резания позволило предполо-

жить, что увеличение скорости резания, которое влечет за собой увеличение скорости деформации материала в процессе обработки, увеличивает степень деформационного упрочнения поверхностных слоев материала. Кроме того, из результатов моделирования предварительно можно утверждать, что с увеличением скорости резания обеспечивается однородное упрочнение пластически деформированного слоя металла в процессе резания. С точки зрения технологии машиностроения это позволяет обеспечить стабильную дислокационную природу накопления повреждаемости материала, как в процессе обработки, так и в процессе эксплуатации изделия. Такой результат может служить одним из критериев износоустойчивости обработанных поверхностей.

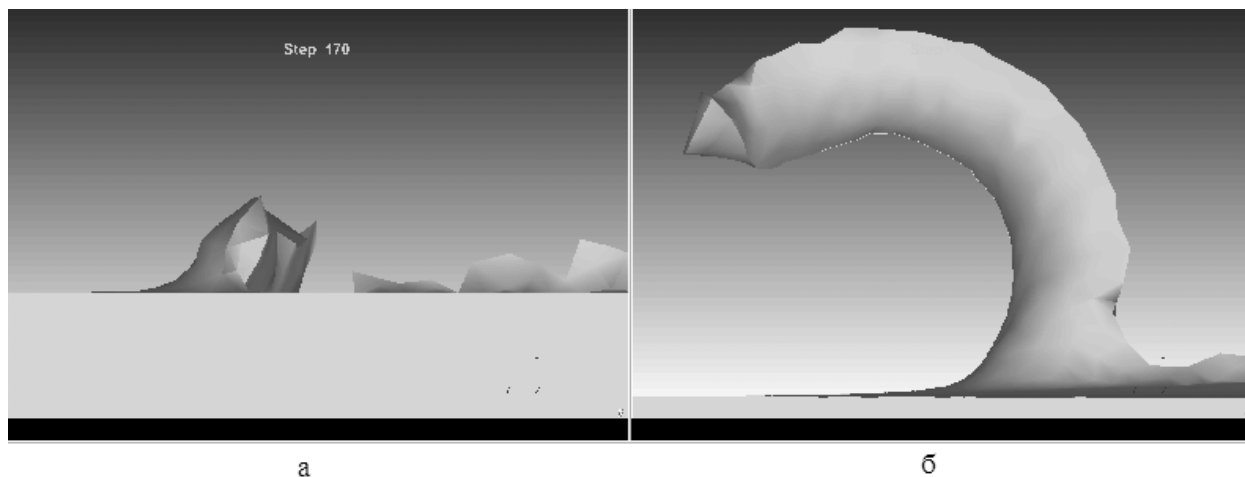


Рис. 6. Моделирование характера стружкообразования при различных скоростях резания и фиксированной подачи на зуб: а) при 15000 об/мин, б) при 21000 об/мин

В процессе имитационного моделирования нами было установлено, что с увеличением наклона режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности увеличивается износостойкость режущего инструмента, снижаются локальные температуры в области резания, происходит торможение автоколебаний и снижение силы резания, повышается точность механообработки. Эти выводы коррелируют с экспериментальными результатами работ [6,7].

По результатам имитационного моделирования мы подготовили план реального эксперимента с оптимальными режимами и стратегиями процесса высокоскоростного концевое фрезерования. Для проведения исследований использовали возможности немецкого вертикального высокоскоростного, 5^й-координатного обрабатывающего центра (ОЦ) «Chiron FZ 15 S».

Из результатов экспериментальных исследований дополнительно установили, что при увеличении угла наклона от 0 до 15 град при одинаковых технологических параметрах процесса резания происходит снижение как продольной (~ на 40%) так и поперечной (~ на 58%) шероховатости обработанной поверхности (рис. 7). Также нами установлено, что при одинаковых режимах процесса резания строчная обработка с половинным перекрытием позволяет получить значение шероховатости меньшее, чем традиционная строчная обработка. Кроме того с увеличением скорости резания при строчной обработке с половинным перекрытием шероховатость обработанной поверхности уменьшается (рис. 8). Это объясняется тем, что при использовании такой стратегии уменьшается влияние перекры-

тия проходов инструмента за счёт уменьшения высоты межстрочных гребешков, а малая глубина удаляемого материала приводит к стабилизации процесса резания. Последнее, по-видимому, можно объяснить уменьшением фазовых колебаний, возникающих в процессе ВСФ концевыми сферическими фрезами при уменьшении глубины срезаемого материала.

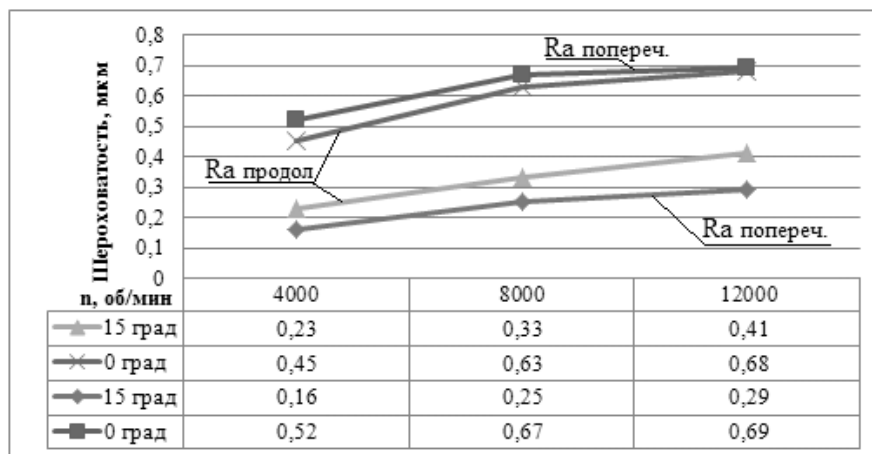


Рис. 7. Изменение шероховатости поверхности в зависимости от угла наклона нормали режущего инструмента к обрабатываемой поверхности

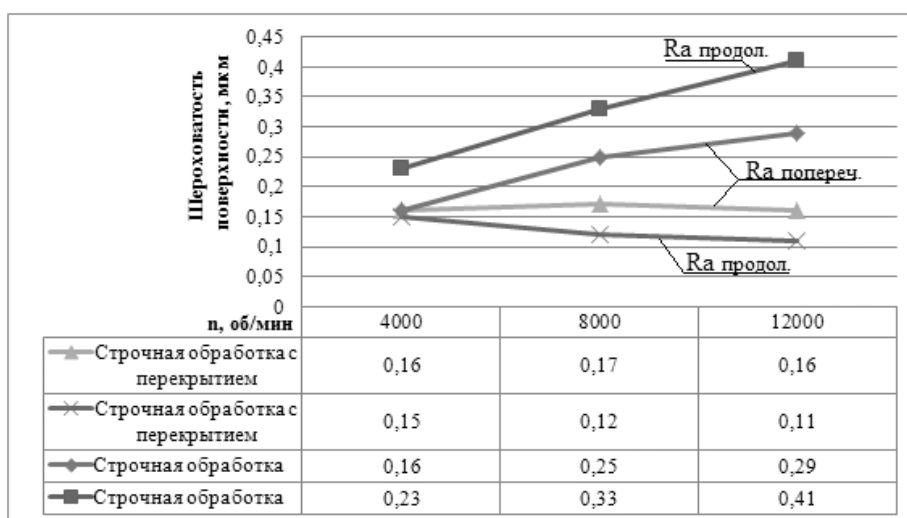


Рис. 8. Влияние стратегии обработки на формирование шероховатости обработанной поверхности

Также в ходе обработки экспериментальных исследований подтвердили результаты компьютерного моделирования о том, что в процессе резания не происходит отпуска поверхностного слоя обрабатываемого материала. Установили, что повышение значения поверхностной микротвёрдости в значительной мере зависит от увеличения скорости резания и износа режущего инструмента (рис. 9).

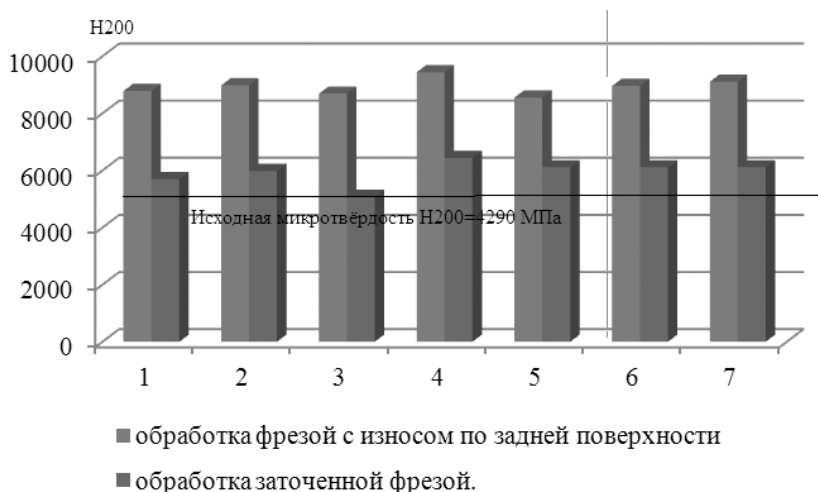


Рис. 9. Изменение поверхностной микротвёрдости закаленной стали 38Х2МЮА после ВСО твердосплавной концевой фрезой SER Z1MB 8MM Z-CARB BALL. Режимы обработки $V_{рез}=197,13$ м/мин, $a_e=0,04$ мм, $a_p=0,4$ мм.

В процессе обработки результатов металлографического исследования шлифов обработанных образцов, мы определили, что при увеличении ширины резания между соседними проходами инструмента глубина залегания белого слоя увеличилась (рис. 10).

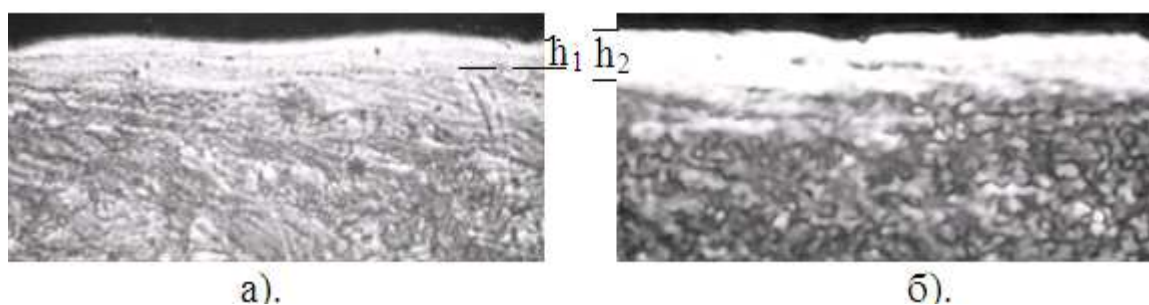


Рис. 10. Изменение интенсивности формирования «белого слоя» в зависимости от ширины между соседними проходами фрезы

Это явление объясняется, по-видимому, тем, что с увеличением ширины резания между смежными проходами инструмента увеличиваются энергозатраты на процесс резания и увеличивается время контакта режущей кромки с обрабатываемым материалом, что способствует более глубокому проникновению температурных вспышек в процессе пластической деформации материала в тело обрабатываемой детали. Неравномерность распределения толщины «белого слоя» при обработке концевыми сферическими фрезами объясняется неравномерностью распределения температурных полей и скоростей резания в каждой точке рабочей кромки фрезы, что вызывает наложение наклёпанных зон при течении металла в процессе резания. Установили, что с увеличением глубины резания поверхностный слой характеризуется «прерывистым белым слоем» и «темным слоем», что свидетельствует о вторичном отпуске материала в процессе резания, появлении в структуре мартенсита отпуска и может привести к понижению предела проч-

ности и упругости материала заготовки, что стало подтверждением, что ВСО – обработка с малыми глубинами резания.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований полностью коррелируют с результатами компьютерного моделирования. Что является подтверждением перспективы использования МКЕ на этапе планирования технологического процесса изготовления трудо- и финансовозатратных изделий. Кроме того, полученные результаты исследований обработанных образцов подтвердили, что высокоскоростное фрезерование позволяет получить хорошее качество обработанной поверхности, а, следовательно, исключить операции шлифования на финишных этапах обработки.

Список литературы

1. Добротворский, С.С. Разработка интегрального функционала качества обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании [Текст] / С.С. Добротворский, Е.В. Басова // Вісник інженерної академії України. – К., 2011. – №3. – С. 125–130.
2. Dhanorker, A. A experimental and modeling study on meso/micro end milling process [Text] / A.Dhanorker, T.Özel // Proceedings of 2006 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering, 2006. – pp. 1071-1079
3. Özel, T. Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining [Text] / T. Özel, E. Zeren // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007. – V35. – №3 - 4. – PP. 255-267.
4. Добротворский, С.С. Моделирование процесса высокоскоростного фрезерования закалённых сталей методом конечных элементов [Текст] / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, С.А. Щучев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – Вып.55. – С. 20-27.
5. Басова Є.В. Математичне моделювання процесу високошвидкісного фрезерування складнооброблювальних матеріалів [Текст] / Є.В. Басова, С.С. Добротворський, С.О. Щучев // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції, Ч.I (15-17 травня 2012 р., Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 91.
6. Sadilek, M. Aspects of Using Tool Axis Inclination Angle / M. Sadilek1, R. Čep, I. Budak and ath. // Strojniški vestnik: Journal of Mechanical Engineering. – 2011. – № 57(9). – PP. 681–688.
7. Lobontiu, M. INFLUENCE OF TOOL AXIS INCLINATION ANGLE ON THE SURFACE ROUGHNESS IN BALL END MILLING OF OLC45 (C45) MATERIAL / M. Lobontiu, I. Pasca // Proceedings in Manufacturing Systems. – 2010. – №5(1). – PP. 1–6.

Рецендент: д.т.н., проф. Пермяков А.А., Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

Поступила в редакцию 1.09.2013

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу високошвидкісного фрезерування на якість обробки загартованої сталі

Проведено всебічні дослідження технологічних параметрів процесу різання загартованих сталей на базі методу кінцевих елементів і експериментального підходу. Результати комп'ютерного моделювання застосовувалися для прогнозування розподілу температур, напружень в процесі різання і характеру стружкоутворення, також для оцінки поверхневої цілісності і твердості обробленого матеріалу. Експериментальний підхід застосовувався для оцінки шорсткості, поверхневої мікротвердості і характеру порушеного шару обробленого матеріалу при різних режимах обробки.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, загартована сталь, моделювання, метод кінцевих елементів, експеримент, якість, твердість, шорсткість, порушений шар.

Investigation of the influence parameters process on the quality of high-speed milling hardened steels

Extensive research process parameters cutting hardened steels based on the finite element method and experimental approach was conducted. The results of computer simulations were used to predict the distribution of temperature and stress distribution in the cutting process and the nature of chip formation, and to assess the integrity of the surface and the hardness of the treated material. The experimental approach was used to estimate the roughness of the surface micro-hardness and the nature of the damaged layer of the treated material under different processing conditions.

Keywords: high-speed milling, hardened steel, modeling, finite element method, the experiment, the quality, hardness, roughness, damaged layer.