

Моделирование процесса высокоскоростного фрезерования закалённых сталей методом конечных элементов

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»*

Смоделирована высокоскоростная фрезерная обработка закалённой стали перлитного класса 38Х2МЮА в среде САЕ-модуля DEFORM-2D. В процессе моделирования рассмотрены особенности и характер распределения напряжений, деформаций, скоростей деформаций, распределение температур между стружкой и обрабатываемой поверхностью. Определена волновая природа процессов, протекающих в зоне высокоскоростного резания.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, закалённая сталь, моделирование, метод конечных элементов, метод сопряжённых градиентов, физические параметры процесса резания, волновая природа процесса резания.

Качество изготавливаемой продукции – важнейший показатель не только для оценки самого изделия, но и работы машиностроительного производства в целом и является фактором его конкурентоспособности. Наиболее перспективным методом достижения оптимального качества поверхности при механообработке сложнопрофильных поверхностей является высокоскоростная обработка фрезерованием, которая получила широкое распространение за рубежом и активно изучается отечественными учеными. Основополагающими можно считать работы Г. Соломона, Т. Скопесека, Г. Шульца, Ю. Свободы, П. Хофмана, Т. Ozel и других исследователей. В целом высокоскоростное фрезерование (ВСФ) и высокая скорость обработки являются концепцией, которая включает в себя гораздо больше, чем просто механическую обработку с высокими скоростями резания. Фактически это вообще новый процесс механообработки с мало изученными физико-химическими процессами резания и его последствиями, с более дорогим и более усовершенствованным оборудованием (частота вращения шпинделя при обработке закалённых легированных сталей достигает 60000 об/мин) и инструментом, которые требуют более высокой квалификации оператора.

В настоящее время ВСФ начинает играть важную роль в промышленности, например, в изготовлении пресс-форм, и самолетостроении. Основное преимущество ВСФ в том, что может быть снято большое количество материала за короткий промежуток времени при относительно небольших размерах инструмента за счет большой скорости вращения шпинделя. Это приводит к относительно низким силам, которые позволяют фрезеровать большие и сложные тонкостенные детали, например крыльчатки, детали фюзеляжа.

Новым перспективным направлением ВСФ является замена процесса доводочного шлифования закалённых сталей высокоскоростным фрезерованием на финишном этапе формообразования. Это обусловлено следующими причинами:

1 Закалённые стали имеют промежуточное состояние между пластичными и хрупкими металлами, причем закалённые 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.

2 Высокие температуры в процессе шлифования (600...16000С) являются причиной самовозгорания и интенсивного горения стружки малых сечений. При определении коэффициента использования материала процесс шлифования оказывается менее эффективным и экономически невыгодным по сравнению с ВСФ.

3 Температурные явления, протекающие в процессе шлифования, могут привести к ухудшению качества поверхностного слоя, увеличению шероховатости, что в результате может снизить рабочий ресурс как отдельной детали, так и механизма в целом.

Таким образом, исследование физико-технических процессов при ВСФ закаленных сталей является актуальным на данный момент времени.

Авторы работы [1] определили, что на формирование качества поверхностного слоя при ВСФ неоспоримое влияние имеют глубина резания, подача на зуб, скорость резания и скорость распространения деформации. Для глубокого понимания явлений, происходящих в процессе ВСФ (механизм формирования стружки, влияние толщины стружки, течение материала, напряжение, деформация и распределение температур в зоне резания), незаменимым инструментом является анализ на основе метода конечных элементов (МКЭ). Кроме того, результаты, полученные из анализа, могут быть приняты как базовые при планировании реальной механообработки, что позволит контролировать силу резания, вибрации инструмента, качество формирования сложного профиля.

В настоящей работе для исследования напряженно-деформированного состояния заготовки при ВСФ использован пакет программ DEFORM, основанный на МКЭ и предназначенный для исследования процессов обработки материалов давлением и резанием.

Программный продукт DEFORM позволяет делать моделирование и расчеты в 3D- и 2D-пространствах. Однако в силу того, что нашей задачей является получение точных расчетов процессов в зоне резания, а не визуализация процессов и грубая оценка расчетных параметров, была выбрана среда 2D. Это обусловлено тем, что для точных расчетов необходима мелкая сетка конечных элементов (КЭ), которая значительно увеличивает время расчетов. Мы также учли опыт предыдущих исследователей, которые тоже проводили свои исследования в 2D-среде [2-3]. Для повышения точности расчетов в интересующей нас области проводилось уменьшение сетки размеров КЭ. При исследованиях использовалось 3104 КЭ. Для корректного задания густоты сетки создавали три окна плотности. Таким образом, мы получили отношение размера КЭ в зоне резания к размеру КЭ в зоне закрепления, равное 10-4.

В DEFORM напряжения и деформации, которые используются в описании напряженно-деформированного состояния, известны как эффективное напряжение $\bar{\sigma}$ и эффективная деформация $\bar{\varepsilon}$. Поэтому при решении задач используются уравнения для эффективных напряжений и эффективных деформаций соответственно [4-6]:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)};$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}.$$

Тепловую энергию рассчитывают по формуле

$$Q_p = \frac{1}{J} \cdot \int_{t_2}^{\bar{t}_2} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon},$$

где $J = 427$ ккал.

Адиабатическая температура определяется формулой

$$T = T_0 + \frac{Q_p}{c \cdot p}.$$

В качестве критерия разрушения для моделирования ВСФ выбран нормализованный критерий Кокрофта – Лейтема, позволяющий с достаточно высокой достоверностью предсказывать разрушение поликристаллических металлов в монотонных процессах пластической деформации. Критерий рассчитывают по формуле

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\bar{\sigma}^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon},$$

где $\bar{\varepsilon}$ – накопленная пластическая деформация;

$d\bar{\varepsilon}$ – приращения накопленной деформации;

$\bar{\sigma}^*$ – максимальное главное растягивающее напряжение;

$\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений.

В Deform-2D при задании перемещения инструмента используется решатель сопряженных градиентов, а при задании усилия, действующего на инструмент, – разреженных матриц. В нашем случае мы использовали первый вариант.

Метод сопряженных градиентов – это итерационный метод для безусловной оптимизации в многомерном пространстве. Основным достоинством метода является то, что он решает квадратичную задачу оптимизации за конечное число шагов. Метод сопряженных градиентов применяется как для оптимизации квадратичного функционала, так и для оптимизации произвольного функционала.

Задаем начальные условия по температуре 20°C и времени $t=0$. Граничными условиями являются условия жесткого закрепления заготовки по координатам X и Y.

При моделировании чистового ВСФ в качестве заготовки была использована сталь 38Х2МЮА (41 HRCэ), в качестве инструмента – двузубая фреза $\varnothing 8$ мм. Была задана скорость вращения инструмента 20000 об/мин и подача на зуб 0.05 мм.

В результате исследований нами было рассчитано распределение напряжений, деформаций, скоростей деформаций, распределение температур между стружкой и обрабатываемой поверхностью (рис. 1 – 4). Распределение температур в режущем инструменте не рассматривались в силу использования многослойного покрытия, минимизирующего теплоотвод в инструмент.

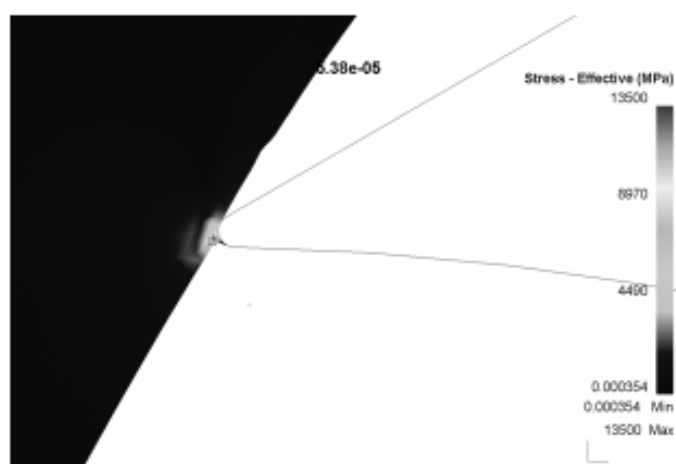


Рис. 1. Эпюра распределения напряжений между стружкой и обрабатываемой поверхностью при врезании инструмента в заготовку

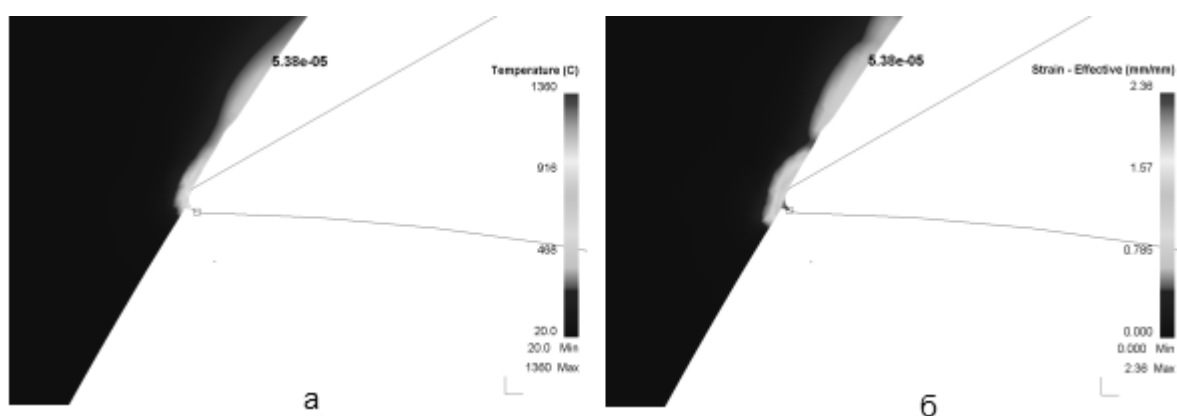


Рис. 2. Эпюра распределения температур (а) и деформации (б) между стружкой и обрабатываемой поверхностью при врезании инструмента в заготовку

Проанализировав полученные результаты эксперимента, мы сделали вывод о том, что предельные (максимальные) режимы резания, где можно назначать режимы обработки, находятся между пиком энергии (рис. 5) и точкой, которая соответствует моменту сброса энергии.

В ходе эксперимента мы установили, что скачкообразный характер деформации материала при моделировании ВСФ объясняется дискретным перемещением дислокаций (рис. 6, а). Такой же характер имеет и напряжение, формируемое в материале, однако оно опережает деформацию материала на 7×10^{-8} с (рис. 7, а).

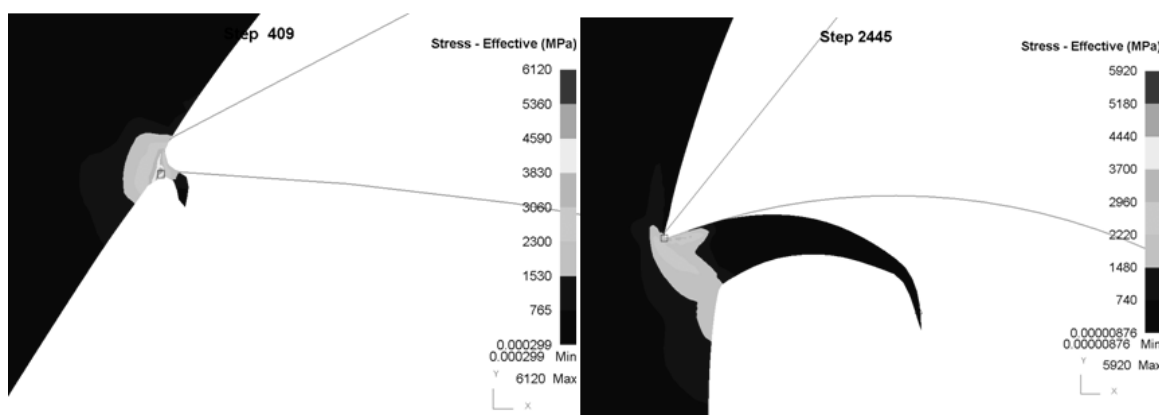


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений между стружкой и обрабатываемой поверхностью в процессе высокоскоростного фрезерования

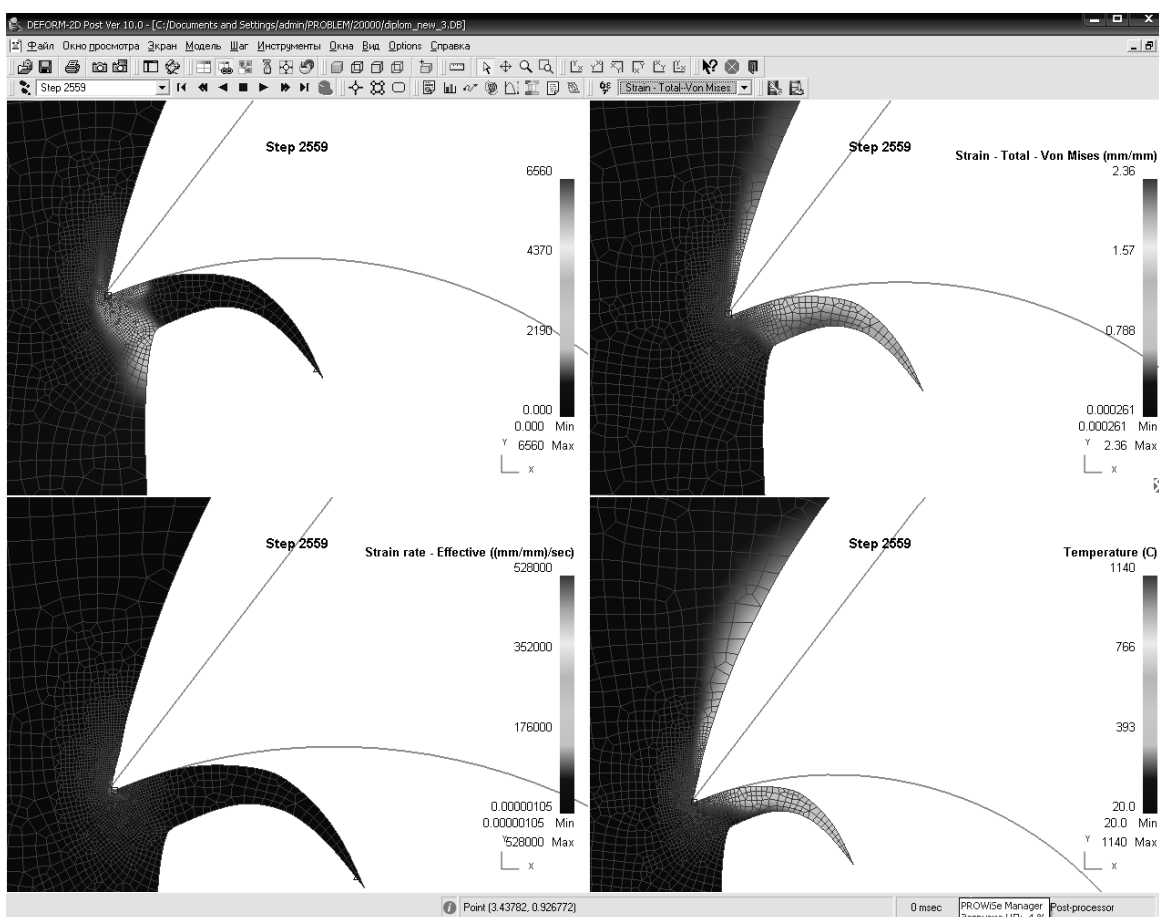


Рис. 4. Эпюры распределения физических параметров в процессе высокоскоростного фрезерования

Из рис. 7, а видно, 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 ско-

рости резания и это является основным признаком отличия высокоскоростного фрезерования от традиционного.

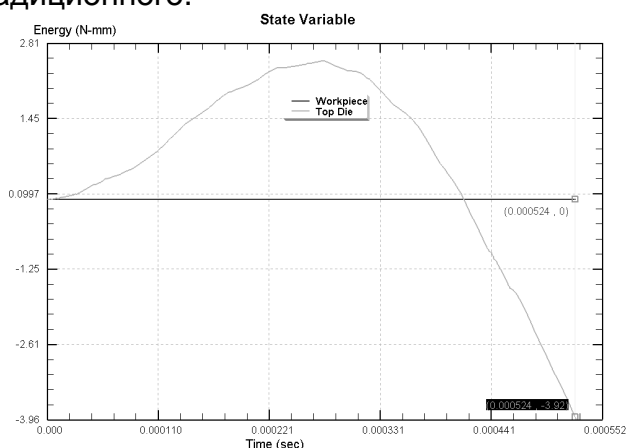


Рис. 5. Распределение энергии процесса резания за период работы одного зуба фрезы

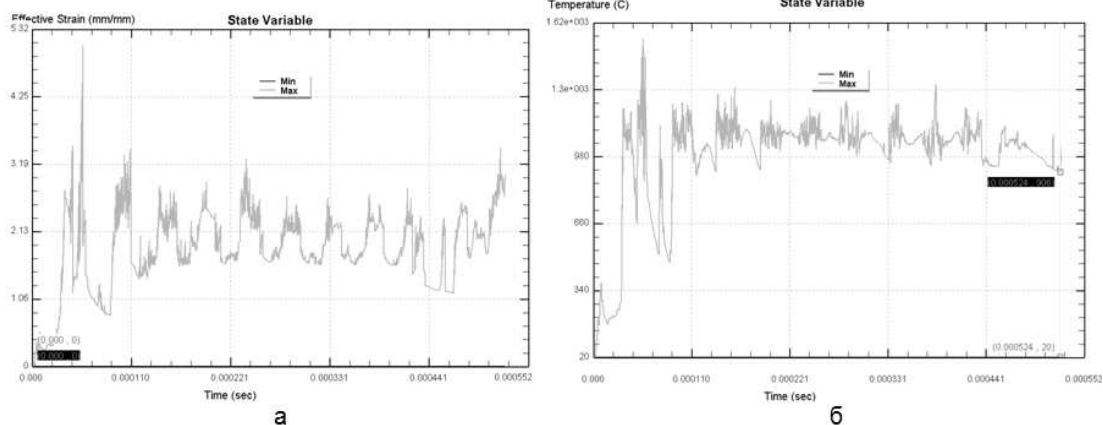


Рис. 6. Графики зависимости изменения деформации материала (а) и максимальных температур, распределяющихся в материал заготовки и стружку (б), от времени работы зуба фрезы

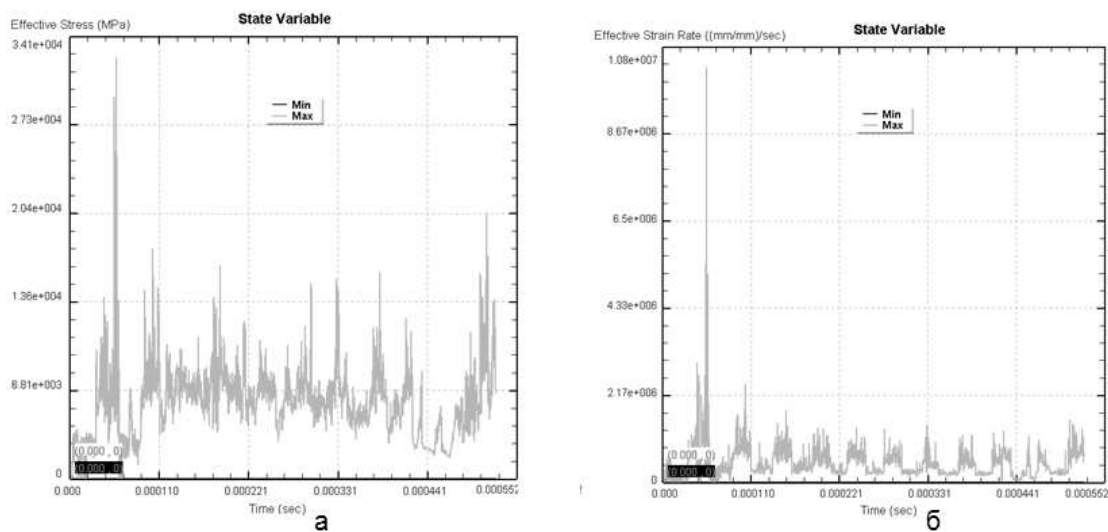


Рис. 7. График зависимости напряжений материала (а) и скорости деформации материала (б) от времени работы зуба фрезы

Выводы

В представленном исследовании была смоделирована высокоскоростная фрезерная обработка закалённой стали перлитного класса 38Х2МЮА в среде САЕ-модуля DEFORM-2D. В результате проведенных экспериментов нами установлено, что с увеличением эффективной скорости резания при фиксированном значении подачи на зуб стружка приобретает сливной характер. Кроме того установили, что при высокоскоростном фрезеровании проявляется волновой характер процессов, близкий по характеру к процессам, характерным для импульсной обработки металлов. Определили, что волна распространения деформации опережает тепловую волну во времени. Рассматривая распределения энергии (между деформацией стружки и деформацией резания материала) в процессе высокоскоростного фрезерования многолезвийным инструментом, определили, что по аналогии с процессами, например лазерного импульсного воздействия, максимальная температура резания запаздывает относительно максимального значения энергии, затрачиваемой в процессе высокоскоростного резания. В процессе моделирования ВСФ закалённой стали были определены области, которые характеризуются граничными условиями процесса высокоскоростной обработки, где и необходимо назначать режимы обработки для получения требуемого качества конечного продукта.

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. – P. 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. – P. 255 – 267.
4. Томсан Э., Механика пластических деформаций при обработке металлов [Текст] / Э. Томсан, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
5. Kobayashi, S. Metal Forming And The Finite-Element Method. / S. Kobayashi. – NY.: Oxford University Press, 1989. – 377p.
6. Banabic, D. Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation [Text] / D. Banabic. – В. – Н.: Springer-Verlag, 2010. – 318 p.

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

Поступила в редакцию 22.06.2012

Моделювання процесу високошвидкісного фрезерування загартованих сталей методом скінченних елементів

Змодельовано високошвидкісну фрезерну обробку загартованої сталі перлітного класу 38Х2МЮА в середовищі САЕ-модуля DEFORM-2D. В процесі моделювання розглянуто особливості і характер розподілу напружень, деформацій, швидкостей деформацій, розподіл температур між стружкою і оброблюваною поверхнею. Визначено хвильову природу процесів, що відбуваються в зоні високошвидкісного різання.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, загартована сталь, моделювання, метод скінченних елементів, метод спряжених градієнтів, фізичні параметри процесу різання, хвильова природа процесу різання.

Simulation of high-speed milling hardened steel finite element method

High-speed milling of hardened steel pearlite 38H2MYUA among CAE module DEFORM-2D was simulated. In the simulation the distribution of stresses, strains, strain rate, temperature distribution between the chip and the machined surface was observed. The wave nature of the processes occurring in the area of high-speed cutting was determined.

Keywords: high-speed milling of quenched steel, modeling, finite element method, conjugate gradient method, the physical parameters of the cutting process, the wave nature of the cutting process.