DOI: *10.25515/PMI.2017.4.446*

Электромеханика и машиностроение

УДК 621.9.014.8

ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ В УПРАВЛЯЕМЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ НА СТАНКАХ С ЧПУ

В.В.МАКСАРОВ[1], **Ю.ОЛЬТ**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Эстонский университет естественных наук, Тарту, Эстония*

В статье рассмотрен метод, позволяющий эффективно управлять процессом резания труднообрабатываемых материалов в рамках реализации локального предварительного физического воздействия, способствующий созданию структурной метастабильности на внешний слой обрабатываемого материала. Предложены новые методы практической реализации нанесения локальной метастабильности на обрабатываемый материал термическим, пластическим и криогенным способом воздействия. Рассмотрены изменения свойств материала при локальном воздействии в качестве широко распространенной графической интерпретации изменения напряжения от деформации. Проведены экспериментальные исследования виброперемещения для подсистемы инструмента по нормали к обрабатываемой поверхности заготовки с локальным пластическим воздействием из стали 45. Теоретические и экспериментальные исследования показали возможность контролировать процесс резания, а также обеспечить динамическую стабильность при обработке высокоточных изделий. Исследования позволят совершенствовать технологии обработки в широком диапазоне материалов и режимов резания, обеспечить сегментацию и дробление стружки в зоне обработки и использовать в процессе управляемые робототехнические комплексы на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: резание материалов, лезвийная обработка, станки с ЧПУ, динамическая стабилизация, сегментация стружки, дробление стружки

***Как цитировать эту статью*:** Максаров В.В. Динамическая стабилизация процесса резания на основе локальной метастабильности в управляемых робототехнических комплексах на станках с ЧПУ / В.В.Максаров, Ю.Ольт // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 446-451. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.446

Введение. Российский рынок роботизированных технологий с использованием станков с ЧПУ пока находится в начальной стадии развития. В ближайшее время спрос на промышленные роботы и станки с ЧПУ будет полностью зависеть от интереса, проявленного к ним владельцами предприятий. Только тогда робототехнические комплексы с использованием станков с ЧПУ в нашей промышленности станут таким же необратимым процессом, как модернизация отечественных предприятий. Преимущества от перехода на роботизированные технологии неизбежно выведут многие наши предприятия на новый технологический уровень, что позволит повысить качество выпускаемой продукции, производительность и гибкость производственных процессов.

Некоторые технологические операции, например, обработка сложнопрофильных деталей, могут быть реализованы как с применением технологических роботов, так и станков типа «обрабатывающий центр». В общем случае задачей и станка, и робота является реализация относительного движения инструмента и обрабатываемой детали по заданному закону с заданной точностью. Закон относительного движения описывается в технологической программе. В связи с этим можно отметить некоторые особенности технологических роботов, зона которых обычно существенно меньше самого станка и находится внутри него, тогда как рабочая зона станка больше робота.

Большинство современных технологий обработки пространственно-сложных изделий требуют движения инструмента по траекториям сложной формы с высокой точностью и фиксированной скоростью. Ранее эти операции выполнялись вручную, однако применяемый инструмент часто являлся слишком тяжелым для человека. Кроме того, не всегда возможно обеспечить требуемое качество движения инструмента по траектории, например, точность и постоянство скорости. Именно на таких операциях при обработке деталей на станках с ЧПУ в настоящее время наиболее целесообразно использование технологических роботов.

Процесс обработки на каждом технологическом переходе образует витую стружку, которая заполняет все рабочее пространство станка и не позволяет роботу-манипулятору осуществлять

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.446*

свободные перемещения в пространстве станка. Данная проблема еще более усугубляется, если производится обработка труднообрабатываемых материалов, к которым относятся нержавеющие стали, а также титан и титановые сплавы.

При обработке сложных изделий из труднообрабатываемых материалов происходит не только ухудшение сегментации и дробление сливной стружки, но еще и потеря устойчивости процесса резания, что ведет к возникновению автоколебаний, повышению интенсивности изнашивания режущего инструмента, снижению долговечности исполнительных механизмов станка, что в конечном итоге ухудшает качество и точность обработки ответственных изделий [1, 6-9, 11, 12]. Разработка основ по снижению интенсивности автоколебаний в технологических системах механической обработки, программно-алгоритмическое обеспечение для решения на ЭВМ позволяют решить задачу автоматизации и управления процессом лезвийной механической обработки на станках типа CNC [2, 3, 13, 14].

В настоящее время в машиностроении можно выделить широкий класс изделий, автоматизация и управление механической обработкой которых требуют особого подхода при решении задач по повышению эффективности процесса резания. К данному классу относятся, прежде всего, изделия из коррозийно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, обрабатываемые на высокопроизводительном автоматизированном оборудовании. С технологической точки зрения желательно в процессе резания иметь сливную стружку, поскольку она является показателем устойчивости технологической системы, обеспечивает высокое качество обработанной поверхности и гарантированную стойкость инструмента, что особенно важно при автоматизации этого процесса. В реальных условиях обработки заготовок образование сливной стружки соответствует очень узкому диапазону состояния технологической системы в процессе резания, который не всегда совпадает с рекомендуемыми режимами резания и стойкостью инструмента для обеспечения необходимой производительности. Следует также отметить, что сливная стружка существенно затрудняет эксплуатацию технологического оборудования, работающего в автоматизированном цикле, является причиной преждевременного износа и аварий станков и приспособлений, может вызывать травмы обслуживающего персонала, затрудняет процесс комплексной механизации и автоматизации уборки стружки и ее последующей переработки [10, 14].

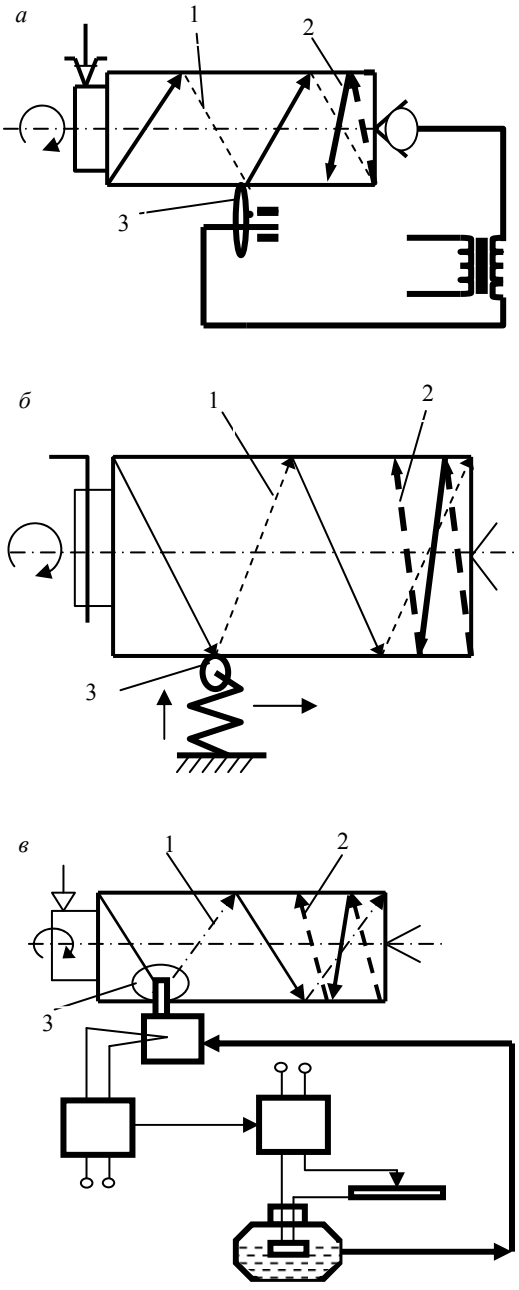


Рис.1. Схема методов практической реализации нанесения локальной метастабильности на обрабатываемый материал
1 – след локального воздействия;
2 – след плоскости резания;
3 – устройство локального воздействия

Методы и материалы. Формирование отрезков стружки заданной длины является одним из важнейших процессов в области лезвийной обработки. Особую актуальность задача управления процессом стружкодробления приобретает при обработке изделий на автоматических станках, станках типа CNC и использовании манипуляторов. На рис.1 предложены схемы методов практической реализации нанесения локальной метастабильности на обрабатываемый материал термическим (рис.1, *а*), пластическим (рис.1, *б*) и криогенным (рис.1, *в*) способами воздействия.

Создаваемая на подлежащей обработке поверхности заготовки по специально заданной траектории локальная метастабильность в области предполагаемого

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.446*

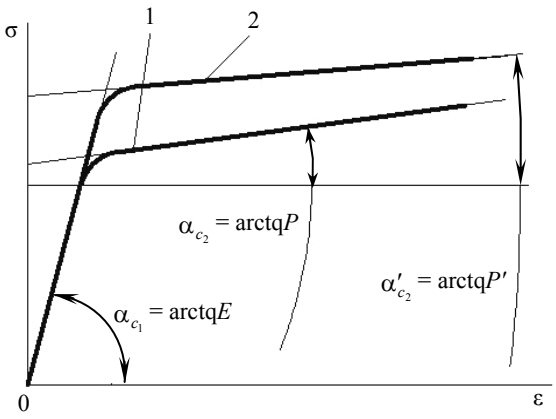


Рис.2. Кривые напряжения – деформации при локальном воздействии
1 – исходный материал; 2 – после локального воздействия

припуска срезаемого материала с глубиной h_m и шириной b_m воздействия приводит к локальным изменениям структуры материала и образованию упругодиссипативных свойств, отличных от основного материала.

Изменения свойств материала при локальном воздействии приведены на рис.2 в качестве широко распространенной графической интерпретации изменения напряжения σ от деформации ε. По кривым напряжения – деформации можно судить, что в исходной структуре материала и в зоне локального воздействия модули упругости E отражают в первом приближении квазиупругие характеристики коэффициентов жесткости c_1 и c_1^1, которые имеют примерно одинаковый характер поведения в зоне пластического воздействия и последующих процессах формирования стружки, а также отражаются коэффициентами жесткости c_2 и c_2^1 и элементами демпфирования β_2 и β_2^1 [2, 4].

При локальном пластическом воздействии на материал обрабатываемой заготовки происходит изменение механических свойств обрабатываемого материала: предела текучести $\sigma_т$, предела прочности условного σ_E, истинного $S_к$, относительного удлинения δ, коэффициента упрочнения k_n. Это воздействие на технологическую систему обуславливает периодическое изменение ее параметров.

С использованием метода локального воздействия выполнялось исследование поведения технологической системы в процессе механической обработки, на основе четырехконтурной динамической модели при контактном взаимодействии подсистем заготовки и инструмента, отображенной многоэлементной реологической моделью стружкообразования [2, 3]. Реологическая модель технологической системы механической обработки учитывает как процесс первичной пластической деформации в зоне срезаемого слоя, так и процессы вторичной деформации и трения при движении стружки по передней поверхности режущего инструмента. Моделирование на основе кусочно-линейной аппроксимации процесса стружкообразования позволило сформировать основы для построения дифференциальных уравнений, описывающих динамические свойства технологической системы механической обработки.

Исходя из этого, поведение выбранной динамической четырехконтурной модели в соответствии с принятой реологической моделью стружкообразования удобно представлять в векторно-матричной форме:

$$T\dot{q} + N(q)\,q = 0, \tag{1}$$

где $q(n\times 1)$ – вектор-функция обобщенных координат системы; T – диагональная матрица размера $(n\times n)$; $N(q)$ – матрица размера $(n\times n)$. В рассматриваемой модели $n = 10$, при этом число контуров n соответствует размерности модели.

Система дифференциальных уравнений (1) описывает динамические процессы в технологической системе механической обработки с учетом упругопластических свойств в динамике контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и реологических особенностей процесса стружкообразования в зоне локального воздействия. На основе полученной системы уравнений в дальнейшем решаются задачи управления процессом стружкодробления.

При обработке заготовок с локальным воздействием для проведения анализа динамического процесса в технологической системе использовалась динамическая модель (1), в которой функция управления ψ, обеспечивающая введение в систему локального воздействия, реализовывалась уравнением

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.446*

$$\psi(G_i)=\begin{cases} G_1 \text{ при } \quad T_{\text{p}_m} \le t < m \quad T_{\text{p}_m}+T_{\text{p}}, \\ T_{\text{p}}=\text{const}, T_{\text{p}_m}=\text{const}, \\ G_2 \text{ при } \quad T_{\text{p}_m}+T_{\text{p}} \le t < (m+1)T_{\text{p}_m}, \\ T_{\text{p}_m}-T_{\text{p}}=T_m=\text{const}, \end{cases} \qquad (2)$$

где $G_1\{c_1, c_2, \beta_2\}$ и $G_2\{c_1^1, c_2^1, \beta_2^1\}$ – параметры состояния, отражающие процесс стружкообразования в исходном материале и в зоне локального изменения свойств материала; T_{p_m} – период локального воздействия; T_{p} – период резания в исходном материале; T_m – период резания в зоне локального воздействия; m – число локальных воздействий, в первом приближении определяется динамическими свойствами технологической системы и длиной витка стружки.

По методике, изложенной в работе [7], осуществлялось моделирование квазиупругих и диссипативных характеристик процесса стружкообразования в исходном материале $G_1\{c_1, c_2, \beta_2\}$ и в локальной зоне $G_2\{c_1^1, c_2^1, \beta_2^1\}$ (рис.3).

Для материала из стали 45 в исходном состоянии и для состояния, отражающего локальное воздействие, приведена зависимость изменения напряжения σ_x и деформации ε во времени t (рис.4).

Построить границу области устойчивости в плоскости параметров b_c – V_s (рис.5) при резании с предварительно подготовленной поверхностью заготовки методом пластического воздействия (см. рис.1, *б*) позволило решение систем уравнений (1) при реализации условий деформации и фазовых переходов (см. рис.2), а также функции управления по локальному пластическому воздействию (2).

Необходимо иметь представление о влиянии неустойчивого процесса резания на стружкодробление при обработке заготовки, подвергнутой локальному пластическому воздействию, в связи с тем, что при токарной обработке в реальных условиях устойчивость технологической системы зависит от многих факторов и изменение любого из них может привести к такому процессу.

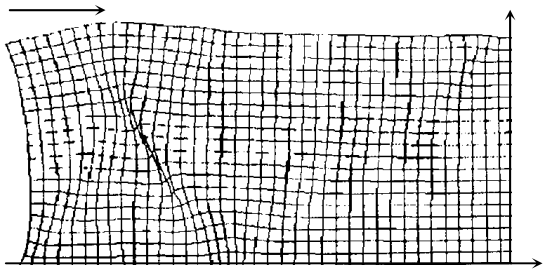


Рис.3. Фрагмент изменения деформации ε по сечению деформируемого материала при локальном пластическом воздействии

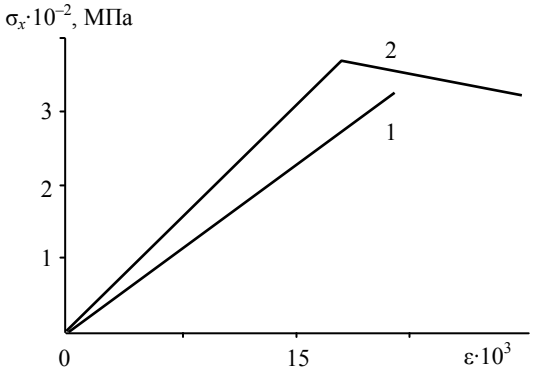


Рис.4. Зависимость напряжений σ_x от деформаций ε
1 – исходное состояние; 2 – локальное пластическое воздействие

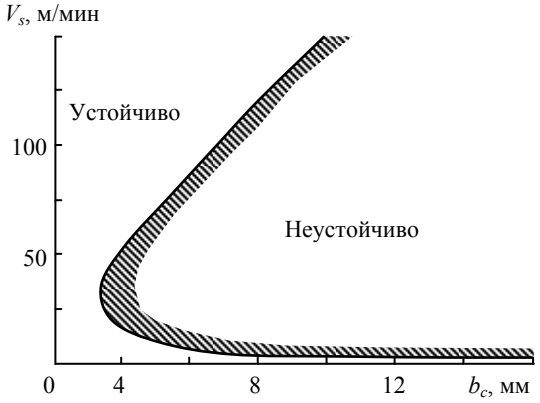


Рис.5. Расчетная граница области устойчивости технологической системы механической обработки в плоскости параметров b_c и V_s

Обсуждение результатов исследований. Проанализировав осциллограммы, можно заявить, что автоколебательный процесс не оказывает влияния на устойчивость процесса стружкодробления, а локальное пластическое воздействие не приводит к развитию автоколебательного процесса.

Проведены экспериментальные исследования виброперемещения для подсистемы инструмента по нормали к обрабатываемой поверхности заготовки с локальным пластическим воздействием из стали 45, на станке модели 1К62 с использованием специального измерительного динамического стенда, которые подтвердили наличие устойчивого процесса резания и надежного формирования стружкодробления в области неустойчивого процесса резания.

При лезвийной обработке заготовок с локальным пластическим воздействием теоретические и экспериментальные исследования поведения технологической системы станка показали, что асинхронное воздействие переменных составляющих квазиупругих и диссипативных параметров зоны

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.446

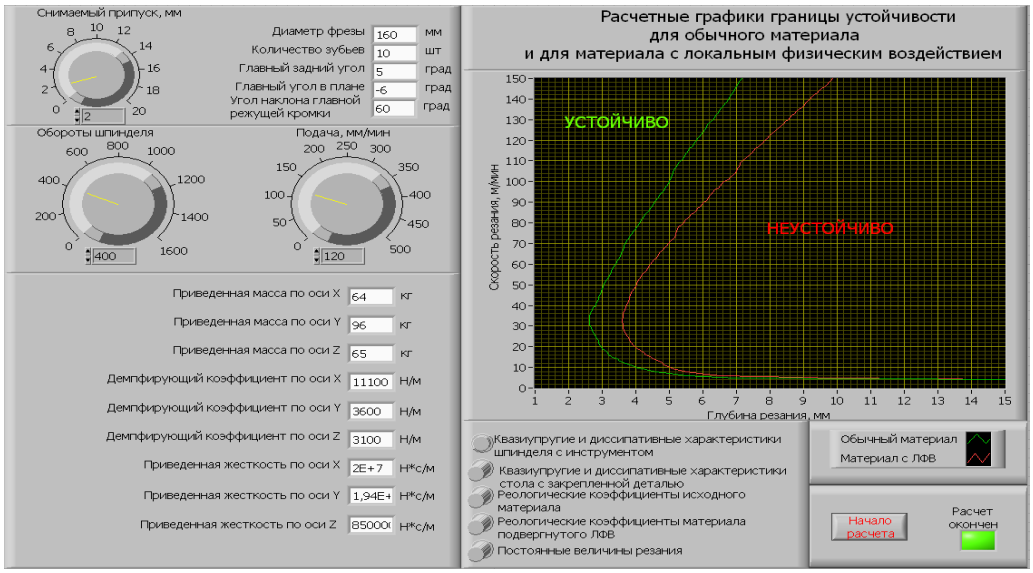


Рис.6. Расчетные границы области устойчивости технологической системы механической обработки на основе инновационных особенностей технологии материалов с использованием программной среды LabVIEW

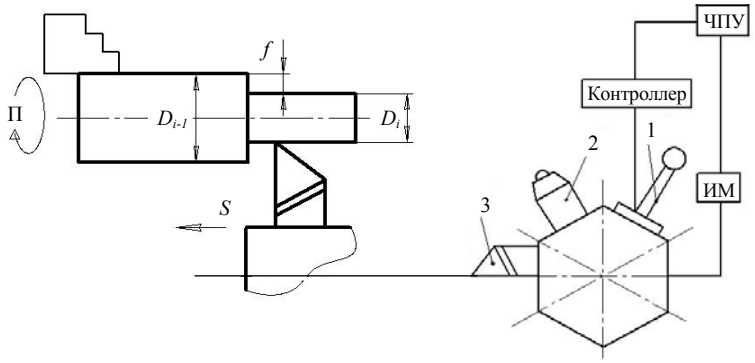


Рис. 7. Программный комплекс на станке типа CNC для управления процессом резания на основе локальной метастабильности

пластического воздействия, обусловленное различием структуры и механических свойств в основном металле и в локальной зоне, позволяет обеспечивать дробление стружки широкого класса обрабатываемых материалов на отрезки заданной длины, что увеличивает производительность и точность механической обработки. Отклонения теоретически полученной границы области устойчивости (рис.5) от построенной по экспериментальным данным составили 17-23 %.

Отделение витков стружки длиной $L_{вит}$ наблюдается при обработке заготовок с предварительно подготовленной поверхностью методом локального воздействия. В числе таких результатов предложена принципиально новая динамическая модель технологической системы механической обработки с учетом реологических особенностей процесса стружкообразования [7], позволившая исследовать динамические характеристики на основе инновационных особенностей технологии материалов с использованием программной среды LabVIEW как в области устойчивого процесса резания, так и в области автоколебаний (рис.6).

Использование метастабильного свойства материала позволяет предложить новый метод управления процессом механической обработки лезвийным инструментом на станках с CNC (рис.7) и рекомендации по автоматизации технологического процесса механической обработки на основе управления процессом стружкообразования.

Заключение

1. Разработан метод, предназначенный для использования в управляемых робототехнических комплексах при обработке труднообрабатываемых материалов на станках с ЧПУ, основанный на локальном воздействии на поверхности материала, приводящем к изменению кристалли-

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.446*

ческой решетки в локальной зоне, образующем высокоэнергетические конфигурации с возникновением повышенной метастабильности структуры в этой локальной зоне. Все это позволяет обеспечить в процессе резания периодическое изменение условий обработки в локальной зоне по сравнению с исходным материалом и обеспечить сегментацию и устойчивое дробление стружки.

2. Теоретические исследования периодически изменяемых параметров рассматриваемой системы, вызываемых локальным воздействием, осуществляются с частотой, значительно меньшей (в 50-100 раз) частоты собственных колебаний системы, что позволяет обеспечить устойчивость системы при изменении частот локального воздействия и собственных колебаний в пределах технологически возможных диапазонов.

3. Низкочастотное параметрическое локальное физическое воздействие на потенциально автоколебательную систему с частотой колебаний, значительно превышающей частоту воздействия, можно рассматривать и как наложение на систему дополнительных вынужденных колебаний с частотой, равной частоте локального воздействия, и амплитудой, равной разнице статических сил резания, обусловленной различием механических свойств металла в рассматриваемых зонах.

4. После теоретических и экспериментальных исследований установлено, что один из наиболее эффективных методов, основанный на создании локальной структурной метастабильности на внешней поверхности срезаемого слоя обрабатываемого материала, реализуемый по определенным законам, позволяет надежно управлять процессом резания труднообрабатываемых материалов и обеспечить прогнозирование динамической стабилизации при обработке высокоточных изделий, что в свою очередь открывает возможности дальнейшего совершенствования технологии обработки в широком диапазоне материалов и режимов резания.

5. Перечисленные результаты дополняют теорию автоматизации и управления процессом лезвийной механической обработки на основе динамического моделирования технологической системы разработанным программно-алгоритмическим обеспечением для решения на ПЭВМ задач динамики технологических систем механической обработки и алгоритмом автоматизированной механической лезвийной обработки с предварительным нанесением локального воздействия, что позволит развить её прикладные аспекты, формируя методическую основу для инженерных разработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анастасиади П.* Неоднородность и работоспособность стали / П.Анастасиади, М.С.Сильников. СПб: Изд-во «Полигон», 2002, 624 с.

2. *Ашкенази Е.К.* Анизотропия конструкционных материалов: Справочник. Л.: Машиностроение, 1980. 148 с.

3. *Бармин В.Н.* Вибрации и режимы резания. М.: Машиностроение, 1985. 72 с.

4. *Бородкин М.М.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов / М.М.Бородкин, Е.Н.Спектор. М.: Металлургия, 1981. 272 с.

5. *Вишняков Я.Д.* Теория образования текстур в металлах и сплавах. М.: Наука, 1979. 329 с.

6. *Вишняков Я.Д.* Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я.Д.Вишняков, В.Д.Пискарев. М.: Металлургия, 1989, 254 с.

7. *Золоторевский А.С.* Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

8. *Микляев П.Т.* Анизотропия механических свойств металлов / П.Т.Микляев, Я.Б.Фридман. М.: Металлургия, 1986. 226 с.

9. *Aurich J.C.* 3D finite element modelling of segmented chip formation / J.C.Aurich, H.Bil // CIRP Annals. 2006. Vol. 55/1. P. 47-50.

10. *Boothroyd G.*Fundamentals of Machining and Machine Tools / G.Boothroyd, W.A.Knight. Boca Raton: CRC Press, 2006. 125 p.

11. *Fang N.* An analytical predictive model and experimental validation for machining with grooved tools incorporating the effects of strains, strain-rates, and temperatures / N.Fang, I.S.Jawahir // CIRP Annals. 2002. Vol. 51/1. P. 83-86.

12. *Marusich T.D.* A methodology for simulation of chip breaking in turning processes using an orthogonal finite element model / T.D.Marusich, C.J.Brand // Proc. 5th CIRP Int. Workshop on Modeling of Machining Operations. West Lafayette. 2002. P. 139-148.

13. *Rahman M.A.* CNC microturning: an application to miniaturization / M.A.Rahman, A.S.Kumar, H.S.Lim // J.Mach. Tools Manuf. 2005. Vol. 45. P. 631-639.

14. *Trent E.M.* Metal Cutting / E.M.Trent, P.K.Wright. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. 220 p.

***Авторы*: В.В.Максаров,** *д-р техн. наук, профессор*, *maks78.54@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Ю.Ольт**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *jyri.olt@emu.ee* (*Эстонский университет естественных наук*, *Тарту*, *Эстония*).

Статья принята к публикации 26.12.2016.