

УДК 621.9.044:620.193

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

В.В. Сабельников, Т.М. Сабельникова, В.А. Тарасов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: smitr@mail.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния высокоскоростного резания на коррозионную стойкость обработанной поверхности деталей из алюминиевого сплава Д16Т и латуни Л62. Установлено, что при высокоскоростном фрезеровании шероховатость обработанной поверхности снижается в 3,5–5 раз по сравнению с традиционными технологиями обработки. Коррозионное воздействие при примененном методе исследования увеличивает шероховатость обработанных поверхностей приблизительно в 2 раза вне зависимости от выбора технологии их обработки. Визуальные наблюдения показали, что примененная технология обработки поверхности существенно влияет на характер протекания коррозионных процессов: при простом фрезеровании поверхность покрывается очагами коррозии размером до 150...200 мкм, а при высокоскоростной обработке очаги коррозии имеют размер до 3...5 мкм и равномерно распределены по поверхности. Режимы высокоскоростного фрезерования также влияют на скорость коррозии обработанной поверхности: увеличение скорости обработки приводит к росту коррозионной стойкости обработанной поверхности, а увеличение подачи — к падению коррозионной стойкости.

Ключевые слова: высокоскоростное резание, высокоскоростное фрезерование, коррозионная стойкость, цветные сплавы, шероховатость обработанной поверхности, скорость обработки, подача режущего инструмента.

EFFECT OF HIGH-SPEED CUTTING ON CORROSION RESISTANCE OF WORKING SURFACES OF PARTS OF NONFERROUS ALLOYS

V.V. Sabel'nikov, T.M. Sabel'nikova, V.A. Tarasov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: smitr@mail.ru

Results of experimental investigations of the high-speed cutting influence on corrosion resistance of the processed surface of parts from the D16T aluminum alloy and the L62 brass are given. It is found that roughness of the processed surface at high-speed milling decreases by 3,5–5 times in comparison with traditional technologies of processing. With the used method of investigations, a corrosive attack approximately doubles a roughness of the processed surfaces regardless of a choice of technology for their processing. Visual supervision has shown that the applied technology of

surface processing significantly influences the behavior of corrosion processes: at simple milling, the surface becomes covered by corrosion centers up to 150–200 μm in size, while at high-speed processing, the centers of corrosion have sizes to 3–5 μm and are evenly distributed over a surface. High-speed cutting conditions also influence the rate of corrosion of the processed surface: an increase in coverage rate leads to a growth in corrosion resistance of the processed surface, while the increase in cutter advance results in the corrosion resistance decrease.

Keywords: high-speed cutting, corrosion resistance, nonferrous alloys, surface undulation, coverage rate, cutter advance.

Высокоскоростная обработка (ВСО) лезвийным инструментом относится к числу перспективных направлений интенсификации процесса резания, которая обеспечивает повышение технико-экономических показателей формирования поверхностей деталей с высоким качеством и точностью. Исследования, выполненные в Балтийском ГТУ им. Д.Ф. Устинова, МГТУ “СТАНКИН”, Техническом университете Дармштадта, Нанкинском университете, МГТУ им. Н.Э. Баумана и в других научных центрах показали [1–5], что увеличение скорости обработки в 5–10 раз по сравнению с общепринятыми нормативными значениями может сопровождаться увеличением в 3–5 раз производительности съема металла; увеличением сил инерции, действующих на обрабатываемый материал, что позволяет без смятия обрабатывать тонкостенные детали с высокой степенью точности и исключает вибрации в технологической системе; снижением уровня шероховатости до значений, сопоставимых с результатами применения процессов шлифования и полирования; снижением температуры нагрева детали, за счет усиленного отвода теплоты со стружкой.

Это делает метод ВСО и, в первую очередь, высокоскоростного фрезерования привлекательным для изготовления нежестких деталей авиационной и ракетной техники: стрингеров и шпангоутов, обтекателей и оболочек, сотовых панелей и тонкостенных панелей с вафельным фоном из сталей, титановых и алюминиевых сплавов [3, 4].

Вместе с этим известно, что технологические воздействия могут приводить к существенному изменению коррозионной стойкости обработанных поверхностей деталей, что важно для целого ряда ответственных изделий авиационной и ракетной техники. К таким исследованиям относятся, например, работы Е.В. Шляковой и Т.В. Тарасовой [6, 7], в которых изучалось изменение коррозионной стойкости поверхностного слоя деталей при воздействии луча лазера.

Задачи и методика исследования. Настоящая работа посвящена актуальной задаче — экспериментальной оценке влияния параметров высокоскоростного резания на коррозионную стойкость деталей из цветных сплавов [8–11].

В качестве объекта исследований выбраны коррозионные процессы на обработанных поверхностях элементов СВЧ конструкций из

латуни марки Л62 и дуралюмина Д16Т, протекание которых ухудшает их функциональные свойства [12, 13]. В частности, известно, что коррозионное воздействие ухудшает шероховатость токонесущих поверхностей волноводов, а увеличение высот микронеровностей, как правило, приводит к изменению электрических свойств: снижению проводимости и возрастанию электрических потерь.

Для экспериментального анализа влияния технологических факторов на коррозионную стойкость поверхности ее обработка была осуществлена тремя способами: фрезерованием на малых подачах (Ф), фрезерованием с последующим шлифованием (ФД), а также высокоскоростным фрезерованием (ВСФ).

Испытания проводились на образцах прямоугольной формы из латуни марки Л62 и дуралюмина Д16Т.

Фрезерование осуществлялось на широкоуниверсальном фрезерном станке повышенной точности мод. 676 концевыми двухперыми фрезами диаметром 25 мм из быстрорежущей стали марки Р18. Шлифование образцов выполнялось на шлифовально-заточном станке мод. 3А64Д с использованием абразивных кругов марки ЭБ40СМ25К5. Режимы обработки соответствовали рекомендациям [14].

Высокоскоростное фрезерование выполнялось на модернизированном универсально-фрезерном станке мод. 6А12П с электрошпинделем специальной разработки в интервале скоростей обработки от 50 до 100 м/с. Согласно классификации профессора П.П. Серебrenицкого [1] этот диапазон скоростей соответствует высокоскоростному резанию. Минутная подача изменялась в пределах 250...800 мм/мин. При осуществлении ВСФ использовались двухперые концевые фрезы диаметром 35...40 мм из быстрорежущей стали марки Р18, изготовленные на Курганском машиностроительном заводе.

Оценка коррозионной стойкости образцов осуществлялась по массовому показателю скорости протекания коррозионного процесса [15]

$$K_M = \frac{\Delta m}{S\tau},$$

а также по изменению внешнего вида рабочей поверхности образцов, при различных способах обработки: Ф, ФД, ВСФ. Размерность показателя K_M — г/(м²·ч). Здесь S — площадь рабочей поверхности образца; τ — продолжительность коррозионного воздействия, которая для всех образцов составляла 72 ч; Δm — потеря массы образца в граммах, обусловленная коррозионным процессом. Взвешивание осуществлялось на рычажных аналитических весах с точностью до 0,1 мг.

Дополнительно определялось изменение шероховатости рабочих поверхностей образцов, полученных при выбранных способах обработки (Ф, ФД, ВСФ) до и после проведения коррозионных исследований. Измерение показателя шероховатости R_a осуществлялось на

специальном профилографе-профилометре, изготовленном в ЦНИИ измерений.

На заключительном этапе проводилось экспериментальное исследование влияния режимов высокоскоростного фрезерования (поддачи и скорости обработки) на скорость протекания коррозии на поверхностях образцов.

В процессе проведения коррозионных испытаний одна из поверхностей образцов считалась рабочей, она подвергалась механической обработке, а нерабочие поверхности предварительно покрывались защитным слоем хлоркаучукового лака.

Ускоренные испытания на общую коррозию проводились при полном погружении испытуемых образцов в 3 %-ный раствор хлорида натрия на 72 ч, согласно ГОСТ 9.017–74.

Предполагалось, что методика ускоренных испытаний на общую коррозию моделировала воздействие различных атмосферных условий, имеющих место в процессе эксплуатации изделий, а именно: солевого тумана, сернистого газа, повышенной влажности, температуры, солнечной радиации и т.д.

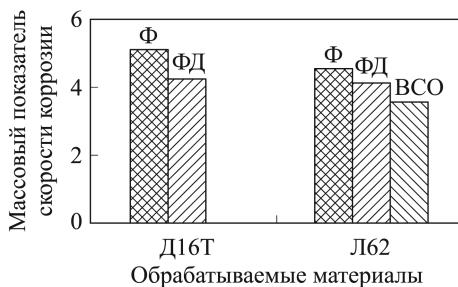
После завершения испытаний продукты коррозии удалялись с рабочих поверхностей образцов, изготовленных из дуралюмина с помощью раствора, содержащего 80 %-ную ортофосфорную кислоту с хромовым ангидридом, а с рабочих поверхностей образцов из латуни — с помощью 5–7 %-ного раствора серной кислоты. Предварительно подтверждалось слабое или полное отсутствие коррозионного воздействия на испытуемые сплавы растворов, используемых для снятия продуктов коррозии [15].

Все однотипные эксперименты повторялись 3–5 раз, обобщение результатов осуществлялось по среднему значению.

Результаты исследований. Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 1... 5. Исследования показали, что наибольшее значение показателя скорости коррозии K_M соответствует рабочим поверхностям образцов, полученных фрезерованием (Ф) (рис. 1). Значения K_M снижаются при обработке образцов из латуни фрезерованием с последующей доводкой (ФД). Наименьшие значения показателя скорости коррозии наблюдаются при высокоскоростном фрезерованием (ВСФ) на всех опробованных материалах. При этом скорость протекания коррозии замедляется на 20,5 % на латуни и на 12,5 % на дуралюмине.

Анализ полученных данных показывает, что дуралюмин Д16Т имеет в целом более низкую коррозионную стойкость по сравнению с латунью Л62, причем эта закономерность сохраняется независимо от способа механической обработки.

Рис. 1. Изменение массового показателя скорости коррозии $K_M \cdot 10^3$ на поверхностях образцов из алюминиевого сплава Д16Т и латуни Л62 в зависимости от технологии механической обработки (примененный режим ВСО: $V = 50$ м/с; $S_M = 400$ мм/мин)



Наряду с количественным определением массового показателя скорости коррозии осуществлялась качественная оценка протекания коррозионного процесса путем визуальных наблюдений рабочих поверхностей образцов до и после проведения испытаний.

Визуальные исследования образцов после фрезерования показывают, что коррозия носит локальный характер, где следы коррозии располагаются отдельными группами в виде точек диаметром 0,1 мкм. Площадь, занимаемая коррозионными поражениями, не превышает 10% общей площади рассматриваемых поверхностей с сохранением их исходного цвета. После коррозионного воздействия поверхность покрывается достаточно крупными коррозионными очагами до 150...200 мкм.

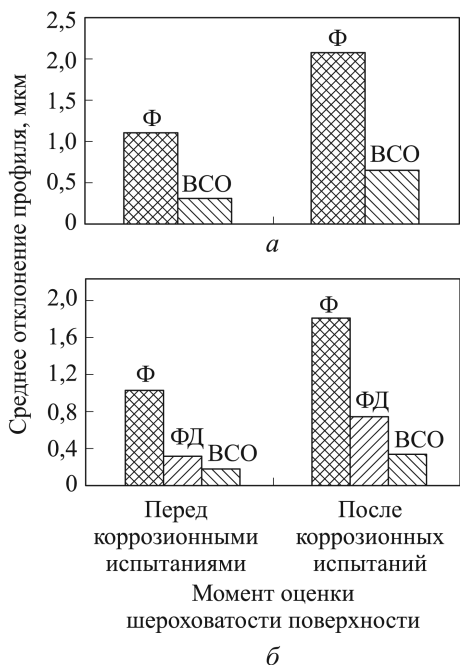


Рис. 2. Влияние процесса коррозии и технологии обработки на шероховатость обработанной поверхности: а – дуралюмин Д16Т; б – латунь Л62

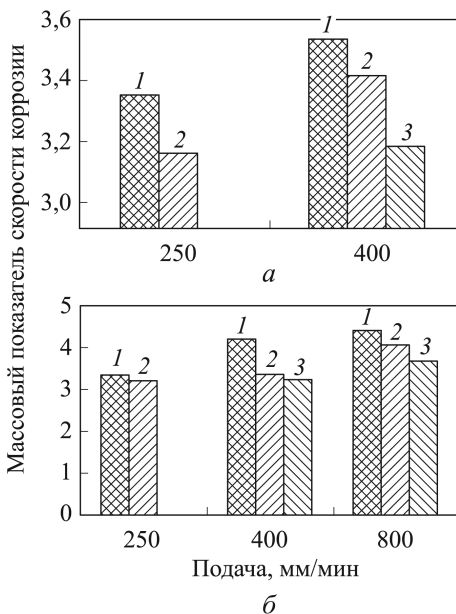


Рис. 3. Изменение массового показателя скорости коррозии $K_M \cdot 10^3$ в зависимости от скорости обработки и подачи при высокоскоростном фрезеровании латуни Л62 и дуралюмина Д16Т. Скорости обработки: 50 м/с (1), 75 м/с (2) и 100 м/с (3)

При переходе к фрезерованию с доводкой рельеф поверхности после коррозионных испытаний характеризуется малыми (до 50 мкм) островками коррозионных очагов, равномерно распределенными по всей площади обработанной поверхности. На образцах из латуни, подвергнутых коррозионному воздействию после фрезерования и доводки, отмечается общее потемнение поверхности с малозаметными очагами коррозии.

После высокоскоростного фрезерования поверхность всех обработанных образцов покрывается сеткой микроцарапин, а на образцах из дуралюмина выявляются отдельные включения, вокруг которых локализуются “дорожки” коррозионных очагов, размером не более 3...5 мкм. Коррозия равномерно распределяется по всей обработанной поверхности, причем рабочие поверхности латунных образцов становятся матовыми без заметных коррозионных поражений, а на поверхности образцов из дуралюмина наблюдаются серии темных полос в направлении перемещения инструмента (подачи).

На рис. 2 приведены диаграммы, отражающие изменение высоты микронеровностей R_a на рабочих поверхностях образцов до и после проведения коррозионных испытаний. Их анализ показывает, что при переходе от простого к высокоскоростному фрезерованию шероховатость обработанной поверхности уменьшается в 3,5–5 раз соответственно для материалов Д16Т и Л62. При этом фрезерование с доводкой уменьшает шероховатость только в 1,7 раза.

Обработка диаграмм с погрешностью 10 % позволяет утверждать также, что коррозионное воздействие во всех случаях вдвое увеличивает исходную шероховатость образцов.

На рис. 3...5 приведены результаты исследования влияния режимов высокоскоростного фрезерования (скорости обработки и подачи) на скорость коррозии обработанных материалов.

Установлено, что сохраняется тенденция повышения коррозионной стойкости с ростом скорости резания (рис. 4). Вместе с этим наблюдается снижение коррозионной стойкости с ростом подачи (рис. 5).

Было также установлено, что скорость коррозии замедляется при ВСФ на образцах из латуни в большей степени, чем на образцах из дуралюмина при одинаковых параметрах (скорости и подаче) высокоскоростной обработки.

Анализ получения результатов. Исследования, выполненные на цветных сплавах — дуралюмине Д16Т и латуни Л62, показали, что высокоскоростное фрезерование повышает коррозионную стойкость обработанных поверхностей деталей. Кроме того, высокоскоростное резание характеризуется незначительным деформированием обрабатываемой детали, получением низкой шероховатости поверхности, а также отсутствием шаржирования обработанного слоя.

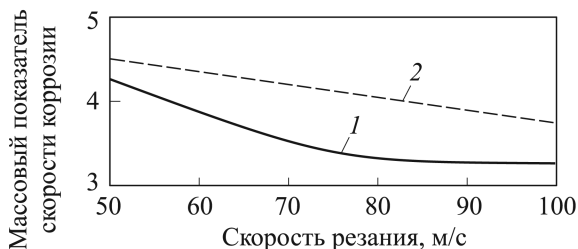


Рис. 4. Изменение массового показателя скорости коррозии $K_M \cdot 10^3$ в зависимости от скорости резания при фиксированной подаче при высокоскоростном фрезеровании латуни Л62:

1 – 400 мм/мин; 2 – 800 мм/мин

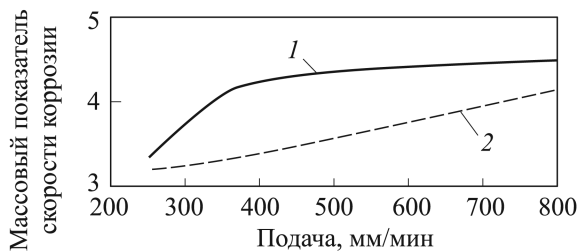


Рис. 5. Изменение массового показателя скорости коррозии $K_M \cdot 10^3$ в зависимости от значения подачи при фиксированной скорости резания при высокоскоростном фрезеровании латуни Л62:

1 – 50 м/с; 2 – 75 м/с

В связи с этим, высокоскоростное фрезерование может стать альтернативой обычным методам механической обработки токонесущих поверхностей тонкостенных конструкций волноводов, для которых традиционная механическая обработка сопровождается относительно высоким уровнем шероховатости ($R_a > 1 \mu\text{м}$), появлением дефектного слоя толщиной 10...20 мкм, а после шлифования наличием в поверхностном слое микрочастиц абразива, интенсифицирующих процессы межкристаллитной коррозии. Высокоскоростное фрезерование может обеспечить увеличение ресурса работы изделий в целом.

Выводы. 1. Установлено, что высокоскоростное фрезерование деталей из цветных сплавов замедляет протекание коррозионного процесса.

2. Коррозионное воздействие увеличивает шероховатость рабочих поверхностей вне зависимости от примененной технологии обработки.

3. Высокоскоростное фрезерование снижает шероховатость обработанной поверхности в 3,5–5 раз по сравнению традиционными технологиями обработки.

4. Увеличение скорости обработки при высокоскоростном фрезеровании приводит к росту коррозионной стойкости обработанной поверхности, а увеличение подачи — к падению коррозионной стойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Серебренницкий П.П.* Некоторые особенности высокоскоростной механической обработки // *Металлообработка*. 2007. № 4. С. 6–15.
2. *Научные основы высокоскоростной обработки* / пер. с англ. под ред. Г. Шульца. Германия: Ханзер, 2002. 202 с.
3. *Камалов В.С., Корнеев С.С., Корнеева В.М.* Экспериментальное и теоретическое обоснование обработки металлов резанием со сверхвысокими скоростями // *Вестник машиностроения*. 1991. № 12. С. 38–41.
4. *Кугультинов С.Д., Ковальчук А.К., Портнов И.И.* Технология обработки конструкционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 672 с.
5. *Потапов В.А.* Международная конференция по высокоскоростной обработке ICHSM' 2004 // *СТИН*. 2005. № 5. С. 36–40.
6. *Тарасова Т.В., Гвоздева Г.О., Деомидова Е.П.* Перспективы использования лазерного излучения для поверхностной обработки цветных сплавов // *Вестник МГТУ “СТАНКИН”*. 2012. № 2.
7. *Шлякова Е.В.* Повышение стойкости к коррозии и износу поверхностей изделия из жаропрочных сталей и сплавов методом лазерной обработки, автореферат диссертации. Омск, 2009.
8. *Ангал Р.* Коррозия и защита от коррозии / пер. с англ. Долгопрудный: ИД “Интеллект”, 2013. 344 с.
9. *Улиг Г.Г., Ревя П.У.* Коррозия и борьба с ней / пер. с англ. под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1989, 456 с.
10. *Фомин Г.С.* Коррозия и защита от коррозий: Энциклопедия международных стандартов. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 520 с.
11. *Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В.* Коррозия и защита от коррозии / под ред. И.В. Семеновой. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 416 с.
12. *Справочник конструктора РЭА. Компоненты механизма, надежность* / Н.А. Баранов, Б.Е. Бердичевский, П.Д. Верхопятницкий и др.; под ред. Р.Г. Варламова. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
13. *Бушминский И.П.* Изготовление элементов конструкции СВЧ. Волноводы и волноводные устройства. М.: Высш. шк., 1989. 304 с.
14. *Сабельников В.В., Тарасов В.А.* и др. Выбор и назначение режимов механической обработки цветных сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1989. 40 с.
15. *Фокин Н.Н., Жигалова К.А.* Методы коррозионных испытаний металлов. М.: Химия, 1989. 312 с.

REFERENCES

- [1] Serebrenitskiy P.P. Some features of high-speed machining process. *Metalloobrabotka* [Metalwork], 2007, no. 4, pp. 6–15 (in Russ.).
- [2] Verlag C.H., Schulz H., eds. Scientific Fundamentals of HSC. München–Wien, 2001. 202 p.
- [3] Kamalov V.S., Korneev S.S., Korneeva V.M. Experimental and theoretical method validation of metal processing by cutting with ultra-high-speed. *Vestn. Mashinostr.* [Russ. Eng. Res.], 1991, no. 12, pp. 38–41 (in Russ.).
- [4] Kugul'tinov S.D., Koval'chuk A.K., Portnov I.I. Tekhnologiya obrabotki konstruktsionnykh materialov [Processing technology of construction materials]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2006. 672 p.
- [5] Potapov V.A. Int. Conf. on High-Speed Processing ICHSM' 2004. *STIN (Stanki i instrument)* [Stanki Instrum.], 2005, no. 5, pp. 36–40 (in Russ.).
- [6] Tarasova T.V., Gvozdeva G.O., Deomidova E.P. Use prospects of the laser radiation for the surface processing of non-ferrous alloys. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. “STANKIN”* [Bull. STANKIN Moscow State Tech. Univ.], 2012, no. 2 (in Russ.).

- [7] Shlyakova E.V. *Povyshenie stoykosti k korrozii i iznosu poverkhnostey izdeliya iz zharoprochnykh staley i splavov metodom lazernoy obrabotki*. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk. [Increasing corrosion stability and wear product surfaces of heat-resistant steels and alloys by laser processing method. Cand. tekhn. sci. diss. abstr.], Omsk, 2009. 20 p.
- [8] Angal R. Corrosion and corrosion protection. (Russ. Ed.: Angal R. Korroziya i zashchita ot korrozii. Per. s angl. A. Kalashnikova. Dolgoprudnyy, ID "Intellekt", 2013. 344 p.).
- [9] Revie R.W., Uhlig H.H. Corrosion and corrosion control. A John Wiley & Sons, inc., Publication, Copyright, 2008. 490 p. (Russ. ed.: Ulig G.G., Revi R.U. Korroziya i bor'ba s ney (per. s angl., pod red. A.M. Sukhotina). Moscow, Khimiya Publ., 1989. 456 p.).
- [10] Fomin G.S. Korroziya i zashchita ot korroziy: Entsiklopediya mezhdunarodnykh standartov [Corrosion and corrosion protection. International Standards Encyclopedia]. Moscow, IPK Izd. Standartov Publ., 1999. 520 p.
- [11] Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V., eds. Korroziya i zashchita ot korrozii [Corrosion and corrosion protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 416 p.
- [12] Barkanov N.A., Berdichevskiy B.E., Verkhopyatnitskiy P.D., Varlamov R.G., eds. Komponenty mekhanizma, nadezhnost' [Components of the mechanism, reliability]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1985. 384 p.
- [13] Bushminskiy I.P. Izgotovlenie elementov konstruksii SVCh. Volnovody i volnovodnye ustroystva [Manufacturing superhigh frequency construction units. Waveguides and waveguide devices], Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1989. 304 p.
- [14] Sabel'nikov V.V., Tarasov V.A., eds. Vybory i naznachenie rezhimov mekhanicheskoy obrabotki tsvetnykh splavov. [Selection and appointment of regimes for machining non-ferrous alloys]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 1989. 40 p.
- [15] Fokin N.N., Zhigalov K.A. Metody korroziyonnykh ispytaniy metallov [Corrosion testing methods for metals]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 312 p.

Статья поступила в редакцию 19.03.2014

Сабельников Виталий Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области обработки металлов резанием.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V. V. Sabel'nikov— Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of “Technologies of Rocket and Space Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of metal cutting.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сабельникова Тамара Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана Автор более 20 научных работ в области ультразвуковой обработки, исследования коррозионных процессов, а также травления пористых сетчатых материалов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

T.M. Sabel'nikova — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of ultrasonic machining, research of corrosion processes and etch of porous-net material.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Тарасов Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области технологии машиностроения, контроля и диагностики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.A. Tarasov — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Technologies of Rocket and Space Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of technology of mechanical engineering, inspection and diagnostics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет книга

Н.П. Деменков, Г.Н. Васильев
Управление техническими системами

Изложены теоретические положения процедур анализа и синтеза систем управления при проектировании станков с числовым программным управлением на основе интеграции силовых, информационных и управляющих модулей. Приведены примеры расчета систем автоматического управления и их элементов.

Для студентов машиностроительных специальностей вузов. Может быть полезен инженерно-техническим работникам предприятий, проектных организаций и институтов, занимающимся автоматизацией производственных процессов и их управлением в машиностроении и других отраслях промышленности.

Часть I. Анализ систем управления

- Глава 1. Основные положения теории систем автоматического управления
- Глава 2. Линейные динамические модели систем автоматического управления техническими объектами и способы их преобразования
- Глава 3. Математические модели систем автоматического управления в переменных состояниях
- Глава 4. Временные и частотные характеристики систем автоматического управления
- Глава 5. Устойчивость линейных систем
- Глава 6. Качество линейных систем автоматического управления
- Глава 7. Построение переходного процесса и повышение качества систем автоматического управления

Часть II. Описание методов синтеза систем управления

- Глава 8. Аналитические методы синтеза линейных систем автоматического управления
- Глава 9. Оптимизация систем управления

Часть III. Проектирование систем управления технологическим оборудованием

- Глава 10. Этапы проектирования систем управления технологическим оборудованием
- Глава 11. Проектирование исполнительных механизмов систем управления
- Глава 12. Технологический контур систем числового программного управления
- Глава 13. Экстремальный контур систем числового программного управления
- Глава 14. Микропроцессорные системы управления технологическим оборудованием