

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И.

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: композиционные материалы, углепластики, металлообрабатывающее оборудование, ползуны, шпиндели, керамоматричные материалы.

Аннотация. Проведен анализ перспектив использования композиционных материалов (КМ) в конструкциях узлов металлообрабатывающего оборудования. Применение КМ, в первую очередь углепластиков на базе высокомодульных углеродных волокон, в этих узлах позволяет повысить точность изготовления, сократить время производства и затраты, связанные с ним, и может рассматриваться как эффективная альтернатива применению традиционных конструкционных материалов.

PROSPECTS FOR THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN STRUCTURES METALWORKING EQUIPMENT

Nilov A.S., Galinskaja O.O., Krasnov V.I.

Baltic State Technical University "VOENMEH", Sant-Petersburg

Keywords: composite materials, carbon plastics, metalworking equipment, slide blocks, spindles, ceramic matrix materials.

Abstract. The analysis of the prospects for the use of composite materials (CM) in the structures of metalworking equipment assemblies has been carried out. The use of CM, primarily CFRPs based on high-modulus carbon fibers, in these units makes it possible to improve manufacturing accuracy, reduce production time and costs associated with it, and can be considered as an effective alternative to the use of traditional structural materials.

Постоянно растущая конкуренция на международных рынках подталкивает производителей к более коротким циклам проектирования, повышению точности изготовления, сокращению времени производства и затрат на их продукты. Эта тенденция порождает спрос на интеллектуальные и скоростные системы, которые способны значительно сократить время обработки при повышении конечной точности. Повышение скоростей вращения осей станков в 2-3 раза выше, чем у обычных, вместе с точностью обработки в субмикронном диапазоне, будет наиболее вероятной целью разработки нового поколения систем механообработки. Одним из направлений решения данной задачи является уменьшение массы деталей металлообрабатывающего оборудования при одновременном повышении их жесткости и демпфирования для получения повышенной статической, динамической и термической устойчивости конструкций станочного оборудования.

Типовыми материалами при изготовлении станочного оборудования на текущий момент времени являются чугун, сталь и в некоторых случаях алюминиевые сплавы. Тем не менее, их удельные прочностные и жесткостные характеристики не могут в полной мере решать указанные выше задачи, что ставит перед разработчиками задачу поиска и применения новых классов материалов с улучшенными внутренними свойствами с точки зрения высокой удельной жесткости, структурного демпфирования и стабильности размеров.

Критерием оценки применяемых и выбора новых материалов может быть использование и сравнение двух параметров: структурного индекса $E^{1/3}/\rho$ и коэффициента демпфирования (коэффициента потерь) η , где E – модуль Юнга, а ρ – плотность материала [1, 2]. Структурный индекс связывает массу и жесткость материала, а коэффициент потерь отражает отношение материалов к гашению вибрации. Значения структурного индекса и коэффициента демпфирования для некоторых материалов приведены в таблице 1 [2].

Табл. 1. Структурные индексы и коэффициенты демпфирования для некоторых материалов

Материал / Параметр	$E^{1/3}/\rho$, ГПа ^{1/3} / (мг/м ³)	$\eta \cdot 10^3$
Чугун	0,63	1,2...1,7
Сталь	0,77	0,6...1,0
Алюминиевые сплавы	1,5	0,2...0,4
Магниевые сплавы	1,9	1...10
Однонаправленные углепластики		
с высокопрочными волокнами	≈ 3,3	1,5...3,0
с высокомодульными волокнами	≈ 4,0	1,5...3,0
с ультравысокомодульными волокнами	≈ 4,4	1,5...3,0
Алюминиевая пена	≈ 2,9	4...10

Как видно из таблицы 1, наибольшими значениями структурного индекса и хорошими демпфирующими свойствами обладают углепластики (УП), в первую очередь с ультравысокомодульными волокнами ($E \geq 700$ ГПа), и алюминиевая пена. Сплавы Mg, имея высокое значение демпфирования и хороший структурный индекс, тем не менее, пока не рассматриваются в качестве альтернативы традиционным материалам, ввиду их достаточно высокой стоимости и производственных затрат.

Потенциалы применения УП с целью облегчения конструкции обеспечивают при этом новые возможности при проектировании и модернизации станочного оборудования: дают возможность повышения динамической жесткости опорных конструкций (например, стоек, балок); уменьшения перемещаемых масс (например, ползунов, колонок); моментов инерции (например, шпинделя); разгрузки приводных систем станков; улучшения динамики движения подачи и точности траектории, а также повышения энергоэффективности станков во время операций механообработки. Кроме того, из-за высоких демпфирующих свойств УП,

могут быть достигнуты повышенные коэффициенты структурного демпфирования. В дополнение, углеродные волокна (УВ), обладая отрицательным коэффициентом линейного термического расширения (КЛТР), дают возможность создавать размерностабильные конструкции или конструкции с очень малыми значениями КЛТР.

Конструкции опорных и подвижных колонн и балок станков могут формироваться как полностью из КМ, так и в виде металло-углепластиковых композиций. В работе [3] представлена конструкция вертикальных и горизонтальных ползунов, стенки которых изготовлены из гибридного материала, для CNC обрабатывающего центра с частотой вращения шпинделя до 35000 мин⁻¹. Конструкции стенок получали путем приклеивания углепластиковых пластин к стальной несущей основе. В результате чего, массовые характеристики таких гибридных конструкций были снижены на 26% и 34% соответственно без снижения изгибной жесткости, при этом коэффициент демпфирования повысился в 1,5-5,7 раза в широком диапазоне частот по сравнению с чисто металлическим вариантом.

Более сложная гибридная структура стенок вертикальных колонн и ползуна для CNC обрабатывающего центра предложена в работе [2] (рис. 1). Применение такого многослойного материала позволило повысить коэффициент демпфирования в 3 раза для ползуна и в 8 раз для колонн, при этом масса обоих элементов была снижена примерно на 20%.

В этой же работе предложен другой вариант конструктивного исполнения корпуса ползуна с использованием УП компонентов. Внешняя обшивка представляет собой тонкие стальные пластины, наклеенные на внутреннюю УП трубу, изготовленную по технологии намотки (материалом является ультравысокомодульные УВ для квадратной трубы и высококомодульные волокна для внутренних углов, используемые в качестве локальных ребер жесткости). Во внутренние углы входят также алюминиевые трубки, используемые для охлаждения и термокondиционирования детали (рис. 2). Такая конструкция позволила снизить массу оболочки на 40% с повышением коэффициента демпфирования в 2,5 раза.

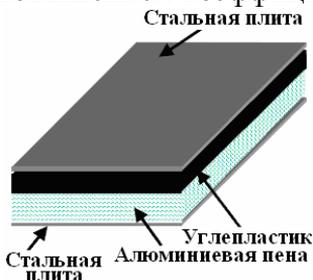


Рис. 1. Структура стенки колонны и ползуна



Рис. 2. Конструктивное металло-композитное исполнение корпуса ползуна



Анализ конструкции гибридной стально-композитной передней бабки для высокоточных шлифовальных станков был проведен в работе [4] (рис. 3). Металло-композитную оболочку передней бабки получали приклеиванием на

стальную основу пластины из однонаправленного стеклопластика. Композитная арматура привела к улучшению динамической жесткости на 12% и увеличению коэффициента потерь на 212% по сравнению со стальной передней бабкой особенно в более высоком диапазоне частот 100-500 Гц. Очевидно, что при замене стеклопластика на УП на базе высокомодульных УВ данный эффект будет еще более существенен.

Еще больший интерес представляют конструкции станочного оборудования, полностью изготовленных из композиционных материалов. В работе [5] представлена конструкция и технология формования УП шпиндельной балки для CNC обрабатывающего центра (рис. 4). Технология формования представляет собой комбинацию намоточных и горячепрессовых операций. Такая конструкция шпиндельной балки позволила снизить вес конструкции более чем на 54 %, а динамическая жесткость при этом увеличилась в среднем в 1,9 раза по сравнению с эквивалентной стальной балкой.

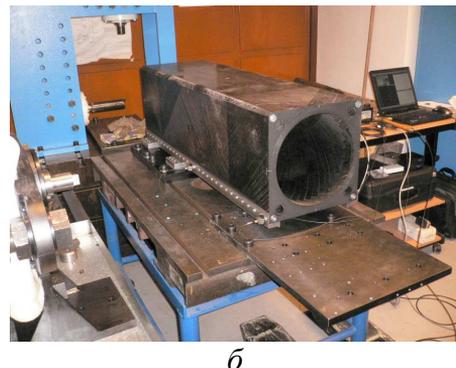
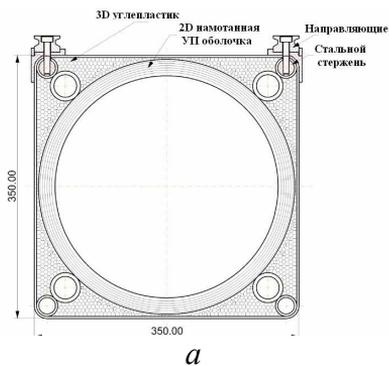


Рис. 4. Конструкция шпиндельной бабки из углепластика: *а* – схема сечения; *б* – общий вид

В другой работе [6] проанализирована замена корпуса вертикального ползуна из металла на углепластиковый для CNC станка, что привело к снижению массы ползуна и энергопотребления до 60% и на 70% соответственно по сравнению с традиционной конструкцией (рис. 5).

Здесь же отмечен высокоскоростной обрабатывающий центр с вертикальными z -образными суппортами из УП, который был представлен компанией MAP (Магдебург, Германия) на выставке ЕМО в 2013 году (рис. 6). Измерения частотных характеристик показали, что на данной модификации центра может быть достигнута та же жесткость, что и у сравнимых чугунных направляющих при существенном снижении веса.

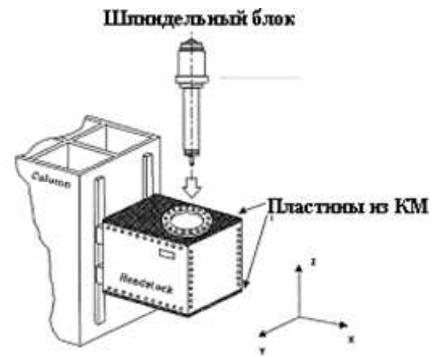


Рис. 3. Конструкции гибридной стально-композитной передней бабки

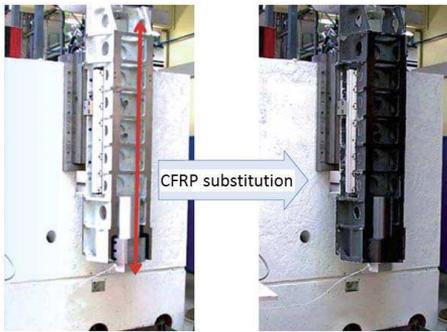


Рис. 5. Пример замены металла на УП у ползуна для CNC станка



Рис. 6. Обрабатывающий центр с вертикальными z-образными суппортами из УП

Шпиндель является одним из наиболее важных компонентов станков, т.к. именно его характеристики, включая тепловые и динамические свойства, в значительной степени влияют на точность и производительность обработки процесса механообработки.

Шпиндели из УП станкостроительные фирмы в последние годы стали использовать для различного рода прецизионных станков. Легкость и прочность этих материалов позволяют повышать рабочие скорости шпиндельных устройств. В шпинделях из УП одни слои УВ наложены один на другой под углом 45° к оси шпинделя (для восприятия крутящего момента), другие вдоль его оси (для восприятия поперечных изгибающих нагрузок), а также третьи – кольцевые (для обеспечения кольцевой прочности). Шпиндель из такого материала может быть в 6 раз легче металлического, следовательно, обладает более высокой виброустойчивостью, а разность тепловых деформаций его передней и задней шеек меньше на 20% [7].

В работе [8] проводилось сравнительное исследование двух типов шпинделей идентичных по геометрическим размерам, но изготовленных из стали и УП (рис. 7). Исследования показали, что масса и момент инерции УП шпинделя были меньше стального в 3,5 и 3,3 раза соответственно, при этом собственная частота вала из УП была эквивалентна частоте стального вала. Тепловое смещение блока шпинделя из УП было меньше на 34% в максимуме, чем у стального шпинделя. Податливость на резонансном пике узла шпинделя из УП была на 46% меньше, чем у стального. Однако податливость на пике резонанса сильно менялась в зависимости от температуры подшипника, которая для УП варианта была выше, чем в случае стального шпинделя.

Главным недостатком чисто УП шпинделей в работе [9] считают необходимость применения слоев со структурой $\pm 45^\circ$ и 0° для компенсации крутящего момента и обеспечения кольцевой прочности в ущерб осевым слоям и, соответственно, снижения в итоге осевой жесткости. Авторами была предложена гибридная схема металло-композитного шпинделя, в котором металлическая часть обеспечивает, главным образом, модуль сдвига и тангенциальную прочность, а УП слои осевую жесткость (рис. 8).

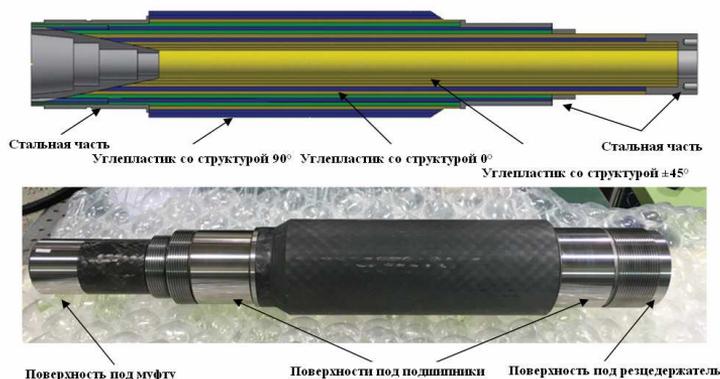


Рис. 7. Схема и общий вид шпинделя из УП [8]

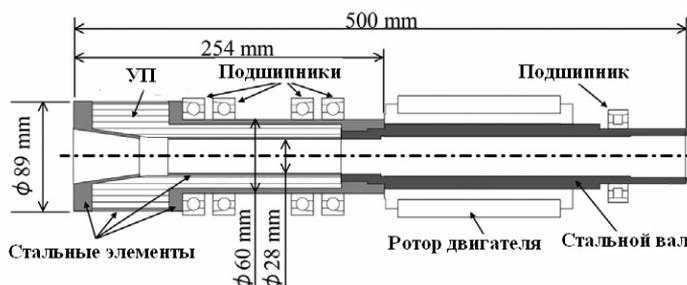


Рис. 8. Гибридная схема металло-композитного шпинделя

Проведенные исследования показали, что хотя статические осевые и сдвиговые жесткости металло-композитной конструкции шпинделя составили 80% и 75% по отношению к чисто стальному варианту, но при этом было на 39% снижено его тепловое расширение, что при частоте вращения шпинделя 12000мин^{-1} дало погрешность теплового расширения на инструмент порядка 5,4 мкм, что почти в 3 раза меньше, чем у чисто стального варианта. Кроме того была существенно снижена масса шпинделя, объемная доля УП в котором составила 60%.

Другой конструктивный вариант гибридного шпинделя предложен в работе [10]. Особенностью данной конструкции является раздельное изготовления части шпинделя из УП с последующим его клеевым соединением со стальным фланцем.

Стремление к снижению износа шеек шпинделя и, следовательно, к повышению его работоспособности привело к тому, что в настоящее время для изготовления шпинделя стали применять различные керамические материалы – карбиды, бориды, нитриды, оксиды [7]. Эти материалы отличаются высокими твердостью и прочностью при повышенных температурах, износо- и коррозионностойкостью, малыми коэффициентами линейного расширения, тепло- и электропроводности, а также изоляционными свойствами. Однако хрупкость керамики существенно ограничивает область их применения.

Данная проблема может быть решена путем армирования керамического материала с получением керамоматрических композитов (КМК),

армированных непрерывными или дискретными волокнами. У них стойкость к тепловым ударам более, чем в пять раз выше, чем у монолитной керамики, а ударная вязкость разрушения достигает значений 14-17 кДж/м² (например, у монолитной SiC-керамики 3-4 кДж/м²) [11]. Из всех конструкционных КМК наиболее широкое распространение получили композиты с SiC-матрицей, армированной УВ – материалы типа C_f/SiC. Благодаря высокой жесткости, твердости, низкой плотности, теплостойкости и стойкости к абразивному износу карбида кремния C_f/SiC-композиты являются одними из возможных материалов для высоконагруженных шпиндельных узлов.

Необходимо отметить, что актуальной задачей практического применения КМК является разработка эффективной технологии их получения. Это связано с тем, что производство изделий из КМК осуществляется с помощью, как правило, достаточно сложных и длительных процессов уплотнения волокнистых каркасов матричным материалом, основанных на различных твердо-, жидко- и газопарофазных методах. Каждая из этих групп методов базируется на принципиально разнообразных физико-химических процессах и приводит к получению КМК, отличающихся как составом и структурой, так и их свойствами. Более подробно методы уплотнения каркаса рассмотрены в работе [12].

Заключение. Таким образом, проведенный анализ показывает широкие перспективы использования композиционных материалов в конструкциях узлов металлообрабатывающего оборудования. Применение КМ в этих узлах позволяет повысить точность изготовления, сократить время производства и затраты, связанные с ним, и может рассматриваться как эффективная альтернатива применению традиционных конструкционных материалов.

Список литературы

1. Ashby M.F. Metal Foams: A Design Guide / M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck et al. – Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000. – 263 p.
2. Merlo A. Advanced composite materials in precision machine tools sector – Applications and perspectives / A. Merlo, D. Ricciardi, A. Cremona et al. // ICCM International Conferences on Composite Materials, Edinburgh, July 27-31, 2009. – 10 p.
3. Lee C. S. A composite cantilever arm for guiding a moving wire in an electrical discharge wire cutting machine / C.S. Lee, J.H. Oh, D.G. Lee, J.H. Choi // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 113. – P. 172-177.
4. Chang S.-H. Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machines / S.-H. Chang, P.J. Kim, D. Lee, J.K. Choi // Composite Structures. – 2001. – Vol. 53(1). – P. 1-8.
5. Uher O. Novel concept of three-dimensional (3D) thick composite structure from pitch based carbon fibre for machine tool applications / O. Uher, J. Smolik, M. Ruzicka // Proceedings of 17th International Conference on Composite Materials - ICCM-17. Edingburgh, 2009. – P. 156-164.
6. Möhring H.-C. Materials in machine tool structures / H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele et al. // CIRP Annals. – 2015. – Vol. 64. – Iss. 2. – P. 725-748.
7. Вереина Л.И. Металлообрабатывающие станки: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 439 с.
8. Kondo R. Evaluation of machine tool spindle using carbon fiber composite / R. Kondo, D. Kono, A. Matsubara // Int. J. of Automation Technology. – 2020. – Vol.14. – No.2. – P.294-303.
9. Kono D. A machine tool motorized spindle with hybrid structure of steel and carbon fiber composite / D. Kono, S. Mizuno, T. Muraki, M. Nakaminami // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 68. – Iss. 1. – P. 389-392.

10. Brecher C. Design and manufacture of a carbon fibre spindle rotor / C. Brecher, R. Schug, S. Schmitz, U. Börner // Science and engineering of composite materials, 2007. – Vol. 14. – P.219-227.
11. Румянцев В.И. Монолитные и керамоматричные композиционные материалы для износостойких пар трения-скольжения / В.И. Румянцев, Л.Н. Кочерга, А.С. Осмаков, Р.Л. Сапронов, 2012. – 9 с. – [Электронный ресурс] <http://www.virial.ru/upload/medialibrary/1aj/moolit.pdf>
12. Гаршин А.П. Современные технологии получения волокнисто-армированных композиционных материалов с керамической огнеупорной матрицей / А.П. Гаршин, В.И. Кулик, С.А. Матвеев, А.С. Нилов // Новые огнеупоры. – 2017. – №4. – С. 20-35.

References

1. Ashby M.F. Metal Foams: A Design Guide / M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck et al. – Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000. – 263 p.
2. Merlo A. Advanced composite materials in precision machine tools sector – Applications and perspectives / A. Merlo, D. Ricciardi, A. Cremona et al. // ICCM International Conferences on Composite Materials, Edinburgh, July 27-31, 2009. – 10 p.
3. Lee C. S. A composite cantilever arm for guiding a moving wire in an electrical discharge wire cutting machine / C.S. Lee, J.H. Oh, D.G. Lee, J.H. Choi // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 113. – P. 172-177.
4. Chang S.-H. Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machines / S.-H. Chang, P.J. Kim, D. Lee, J.K. Choi // Composite Structures. – 2001. – Vol. 53(1). – P. 1-8.
5. Uher O. Novel concept of three-dimensional (3D) thick composite structure from pitch based carbon fibre for machine tool applications / O. Uher, J. Smolik, M. Ruzicka // Proceedings of 17th International Conference on Composite Materials - ICCM-17. Edinburg, 2009. – P. 156-164.
6. Möhring H.-C. Materials in machine tool structures / H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele et al. // CIRP Annals. – 2015. – Vol. 64. – Iss. 2. – P. 725-748.
7. Vereina L.I. Metalworking machines: textbook. – Moscow: INFRA-M, 2017. – 439 p.
8. Kondo R. Evaluation of machine tool spindle using carbon fiber composite / R. Kondo, D. Kono, A. Matsubara // Int. J. of Automation Technology. – 2020. – Vol.14. – No.2. – P.294-303.
9. Kono D. A machine tool motorized spindle with hybrid structure of steel and carbon fiber composite / D. Kono, S. Mizuno, T. Muraki, M. Nakaminami // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 68. – Iss. 1. – P. 389-392.
10. Brecher C. Design and manufacture of a carbon fibre spindle rotor / C. Brecher, R. Schug, S. Schmitz, U. Börner // Science and engineering of composite materials, 2007. – Vol. 14. – P. 219-227.
11. Rummyantsev V.I. Monolithic and ceramic-matrix composite materials for wear-resistant friction-sliding pairs / V.I. Rummyantsev, L.N. Kocherga, A.S. Osmakov, R.L. Saproinov, 2012. – 9 p. [Electronic resource] <http://www.virial.ru/upload/medialibrary/1aj/moolit.pdf>
12. Garshin A.P. Modern technologies for obtaining fiber-reinforced composite materials with ceramic refractory matrix / A.P. Garshin, V.I. Kulik, S.A. Matveev, A.S. Nilov // New refractories. – 2017. – №4. – P. 20-35.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Нилов Алексей Сергеевич – к.т.н., доцент	Nilov Aleksey Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor
Галинская Ольга Олеговна – к.т.н., доцент	Galinskaja Olga Olegovna – candidate of technical sciences, associate professor
Краснов Валерий Иванович – к.т.н., доцент	Krasnov Valery Ivanovich – candidate of technical sciences, associate professor
alexey.s.nilov@gmail.com	

Получена 25.01.2022