

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ
РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ
С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЧЕСКИ СМЕННЫХ УЗЛОВ**

© 2014

Д.Г. Левашкин, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: перекомпоуемые производственные системы; автоматически сменный модуль; спутник автоматической линии; гибкая производственная система; многосторонняя обработка деталей; точность; жесткость.

Аннотация: Рассмотрены вопросы обеспечения точности обработки деталей с применением автоматически сменных узлов и перекомпонования рабочей позиции перекомпоуемых производственных систем. Показано суммирующее влияние точности базирования автоматически сменных узлов и жесткости их корпуса на точность многосторонней обработки деталей. Для решения вопросов многосторонней обработки деталей предложена модель автоматически сменного узла – носителя деталей для моделирования вопросов обеспечения точности базирования и жесткости корпуса носителя на рабочей позиции перекомпоуемой производственной системы. Приведена конструкция носителя, выполненного в виде правильной прямоугольной призмы, где на боковых гранях расположены базирующие отверстия, а установку комплекта приспособления и детали выполняют в плоскости каждой грани. При этом обеспечивается пространственная повторяемость положения деталей относительно технологических узлов рабочей позиции и равная жесткость корпуса носителя в направлениях многосторонней обработки деталей. В статье рассмотрена модель системы равнорасположенных базирующих отверстий для моделирования точности базирования носителя. На основе размерного анализа показано влияние взаимного расположения каждого базирующего отверстия носителя на точность обработки детали. Данный аспект является определяющим для реализации многосторонней обработки деталей на носителе. Показано, что на точность многосторонней обработки деталей оказывают влияние силовые смещения корпуса носителя, возникающие вследствие наложения переменных внешних силовых факторов механической обработки. Проведен анализ многообразия направлений силовых воздействий, что позволило определить силовые факторы и говорить об исследовании вариантных схем пространственного нагружения корпуса носителя. Показан переменный характер силового нагружения корпуса носителя как аспекта, определяющего переменный характер возникающих силовых смещений при многосторонней обработке деталей. Таким образом, совместное рассмотрение представленных аспектов обеспечения жесткости и точности базирования позволит решить задачи обеспечения точности многосторонней обработки деталей на носителях.

Современные станочные системы характеризуют быстротечность технологической базы, расширение номенклатуры выпускаемой продукции, сокращение времени на подготовку производства, а также внедрение энергоэффективных технологий [1; 2; 3]. Результатом такой интеграции является переход от стационарных станочных систем с жесткой компоновкой к перекомпоуемым системам, производствам переменной структуры и компоновки (RMS) на основе применения автоматически сменных производственно-технологических модулей (носителей) [4; 5; 6; 7; 8].

Основой функционирования RMS является: перекомпоуемость, изменение конфигурации и архитектуры основных и вспомогательных узлов, переменная во времени организация кинематических связей и кинематических структур, процессов управления. Наряду с известными решениями это возможно обеспечить, например, применением в качестве узлов базирования, крепления и транспортировки деталей автоматически сменные узлы (носители) призматической формы [9; 10].

Эффективность внедрения носителей связана с решением вопросов обеспечения их жесткости и точности. Это связано с многообразием направлений действия сил резания при многосторонней, многоместной механической обработке деталей и необходимостью обеспечения точности базирования деталей на корпусе носителя с сохранением идентичности пространственного расположения их базовых и обрабатываемых поверхностей. Целью данной работы является анализ

и формирование методологических аспектов вопросов обеспечения точности и жесткости автоматически сменных узлов для реконфигурируемых производственных систем. В результате перекомпонования RMS обеспечивается многовариантность производственных процессов обработки деталей одного или нескольких наименований на одной рабочей позиции. Так, для рабочей позиции RMS (рис. 1) носители 2, 3 с размещением исполнительных узлов являются автоматически сменными [9; 10].

Для обеспечения многоместной и многосторонней обработки деталей используют носитель 1. Данная компоновка RMS имеет существенные технико-эксплуатационные преимущества по сравнению с традиционными автоматизированными системами. Осуществляется наиболее полная обработка детали на отдельной рабочей позиции. Дифференциация процесса обработки деталей на рабочей позиции по технологическим переходам с чередованием смены инструмента. Существенно растут производительность, сокращаются производственные площади.

При выполнении обработки деталей на носителе RMS призматической формы (см. рис. 2) для базирования и крепления деталей на плитах – приспособлениях могут быть задействованы все шесть граней корпуса.

Использование симметрично расположенных базирующих отверстий (1) на каждой грани (4) позволяет использовать типовую схему базирования. Носитель в этом случае – агрегат, служащий для размещения

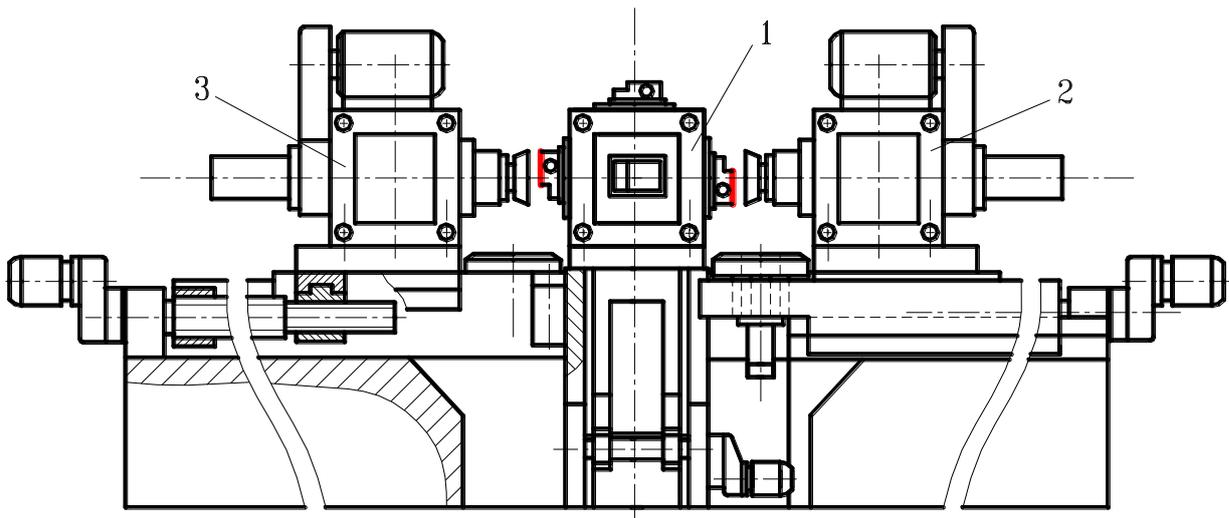


Рис. 1. Общий вид рабочей позиции RMS

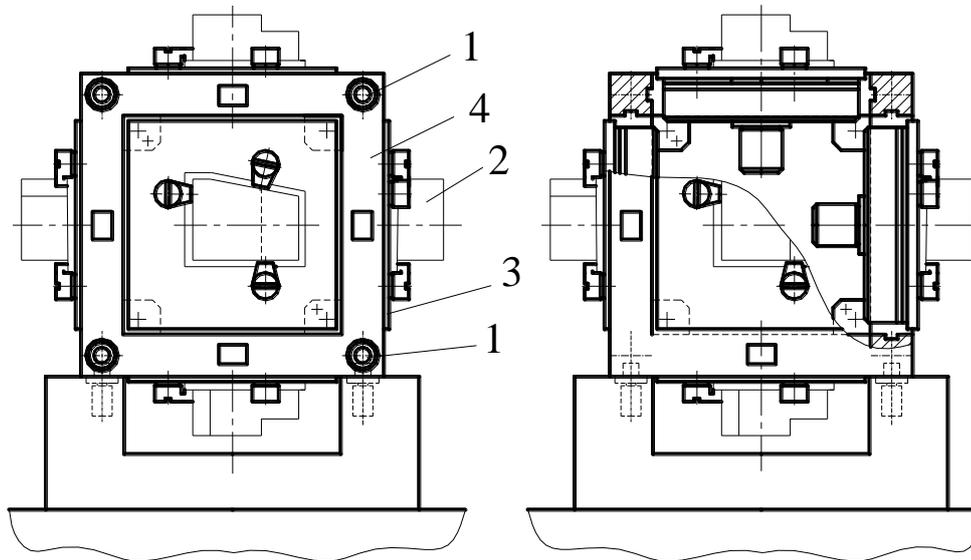


Рис. 2. Общий вид носителя RMS

на боковых гранях (4) корпуса деталей (2) и блока приспособлений, закрепленных на плитах (3) (рис. 2). Комплект плит с блоком приспособлений (3) и деталями (2) устанавливается в окна корпуса носителя. Обеспечивается совмещение времени автоматизации смены обработанной детали со стороны одной грани и времени обработки деталей со стороны других граней корпуса носителя.

Однако внедрение носителей призматической формы и развитие процессов их применения в RMS связано с решением ряда вопросов обеспечения точности и жесткости их изготовления.

Рассмотрим примеры технологических наладок многоместной обработки нескольких деталей с применением носителя и спутников автоматических линий. Симметричная форма корпуса носителя имеет равножесткую конструкцию с возможностью обеспечения инструментального воздействия со стороны каждой грани

и позволяет максимально обеспечить концентрацию процессов обработки (рис. 3).

В отличие от спутника автоматических линий (АЛ), для базирования носителя применяют попарно два из четырех базирующих отверстий на каждой грани его корпуса. Это означает, что при ориентировании носителя на рабочей позиции допускается вариантность базирования носителя: 1) со стороны нижерасположенной грани; 2) со стороны верхней грани; 3) со стороны боковых граней; 4) по нескольким граням, – устанавливая на носителе как обрабатываемые детали, так и узлы, механизмы, с любой стороной по отношению к обрабатываемым узлам на рабочей позиции (рис. 1).

Выделим комплект (группу) базирующих отверстий $T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m$ из множества $T_i = \{T_1, T_2, \dots, T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m\}$ на плоскости одной грани, расположение которых взаимосвязано (рис. 4). Каждое из отверстий

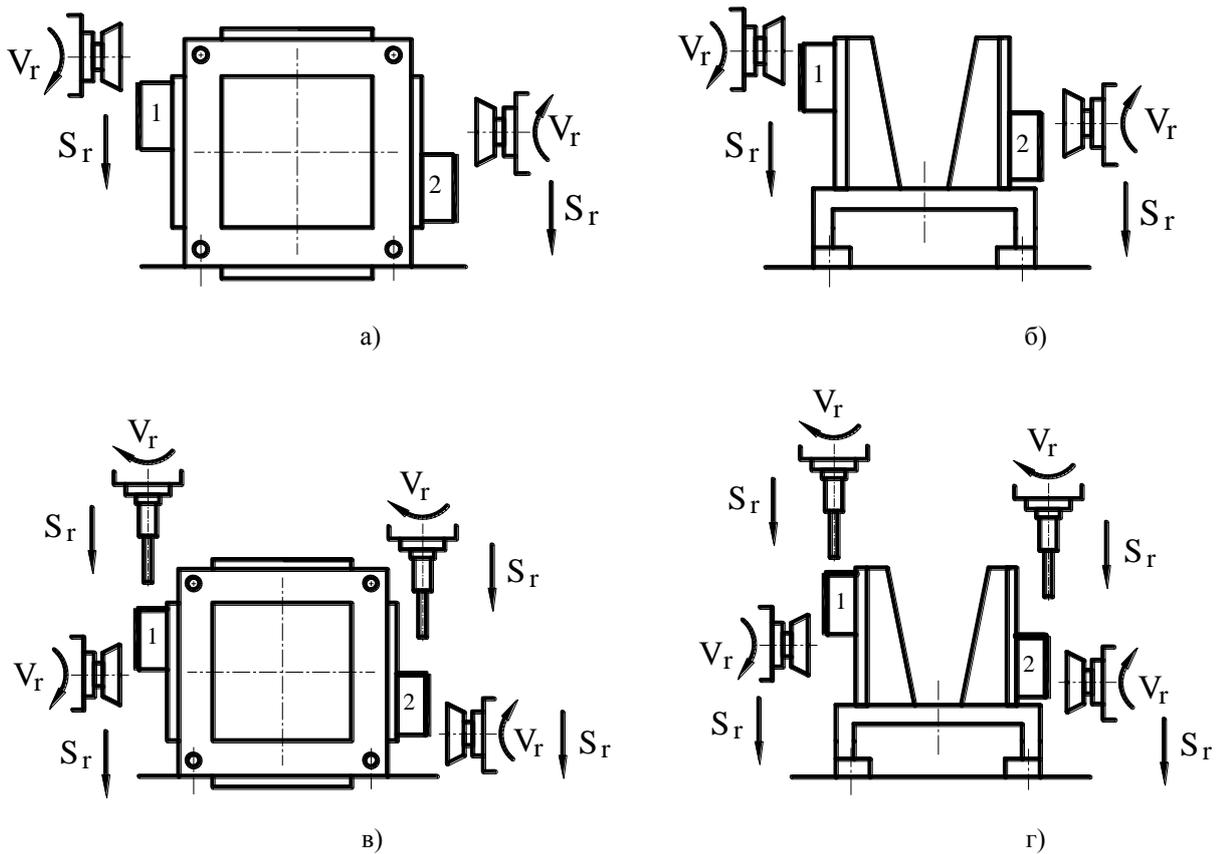


Рис. 3. Схемы выполнения многоместной обработки двух деталей для а) носителя RMS и б) спутника АЛ и многоместной двухсторонней обработки двух деталей для в) носителя RMS и г) спутника АЛ
 V_r – скорость вращения инструмента, S_r – подача инструмента

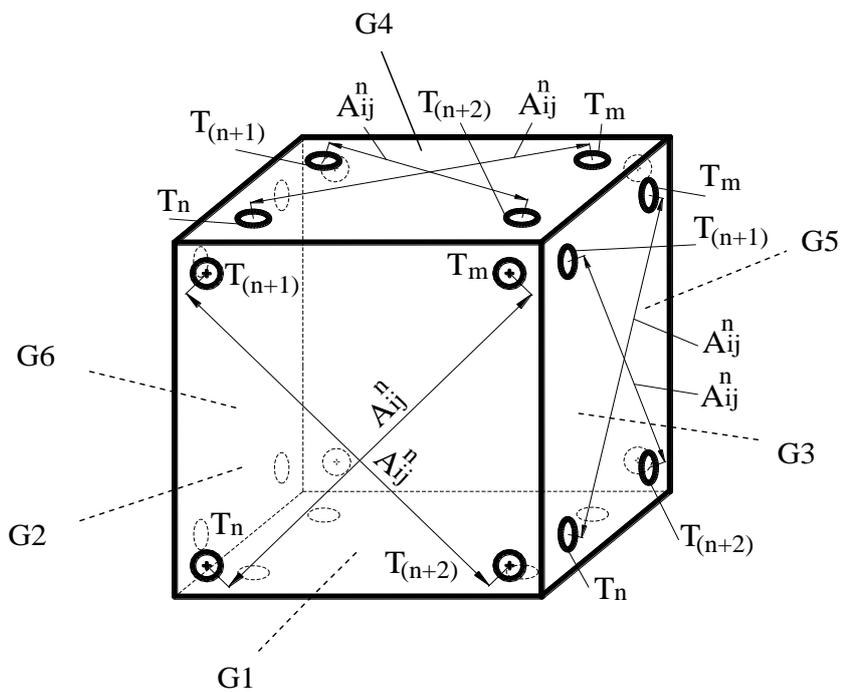


Рис. 4. Модель носителя с базирующими отверстиями на гранях корпуса

с учетом погрешности обработки имеет ограниченное пределами поле допуска ΔT на диаметр обрабатываемого отверстия [11]:

$$T_n \pm \Delta T_n, T_{n+1} \pm \Delta T_{n+1}, T_{n+2} \pm \Delta T_{n+2}, T_m \pm \Delta T_m \quad (1).$$

Плоскость каждой грани в виде квадрата ограничена плоскостями взаимоперпендикулярных прилегающих боковых граней носителя и определена размерами B_{ij} сторон грани множества

$$B_{ij} = \{B_{n(n+1)}, B_{n(n+2)}, B_{(n+1)m}, B_{(n+2)m}\} \quad (2).$$

При многосторонней обработке с применением носителя (рис. 3) на точность обработки размеров деталей накладываются погрешности расположения базирующих отверстий $T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m$ на гранях $G1 \dots G6$, относительно которых носитель устанавливаются на рабочей позиции RMS.

В этой связи необходимо учесть влияние расположения каждой грани G на расположение базирующих отверстий $T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m$, так как они определяют точность межцентровых расстояний A_{ij} .

Обеспечение точного взаимного расположения боковых граней носителя при многосторонней обработке деталей также должно учитывать влияние упругих деформаций корпуса носителя при наложении на него

внешних усилий резания при многоинструментальном воздействии на детали.

Многообразие сочетаний методов технологического воздействия при многосторонней и многоинструментальной обработке приводит к возникновению переменных по величине упругих деформаций корпуса узла, а следовательно, и к изменению точности изготовления деталей. В каждом случае реализации многосторонней обработки упругие деформации корпуса узла переменны [4].

Одновременная обработка деталей на гранях G носителя соответствует совмещенной во времени подаче (нескольких) шпиндельных узлов в зону обработки и обработке деталей, закрепленных на различных гранях (рис. 1).

Результирующие силы резания P_k^n распределяются относительно грани в направлениях, соответствующих многоинструментальной обработке, образуя общее пространство силового нагружения $\Omega(x, y, z)$ с количеством n одновременно обрабатываемых деталей на носителе. По отношению к каждой грани действует своя результирующая сила резания P_k^n .

На рис. 5 место расположения на боковых гранях деталей (3), закрепленных на плитах – приспособлениях (4), определяется конструкцией носителя, а также пространством расположения и объемом рабочей зоны (5) инструментального воздействия для каждой грани (2).

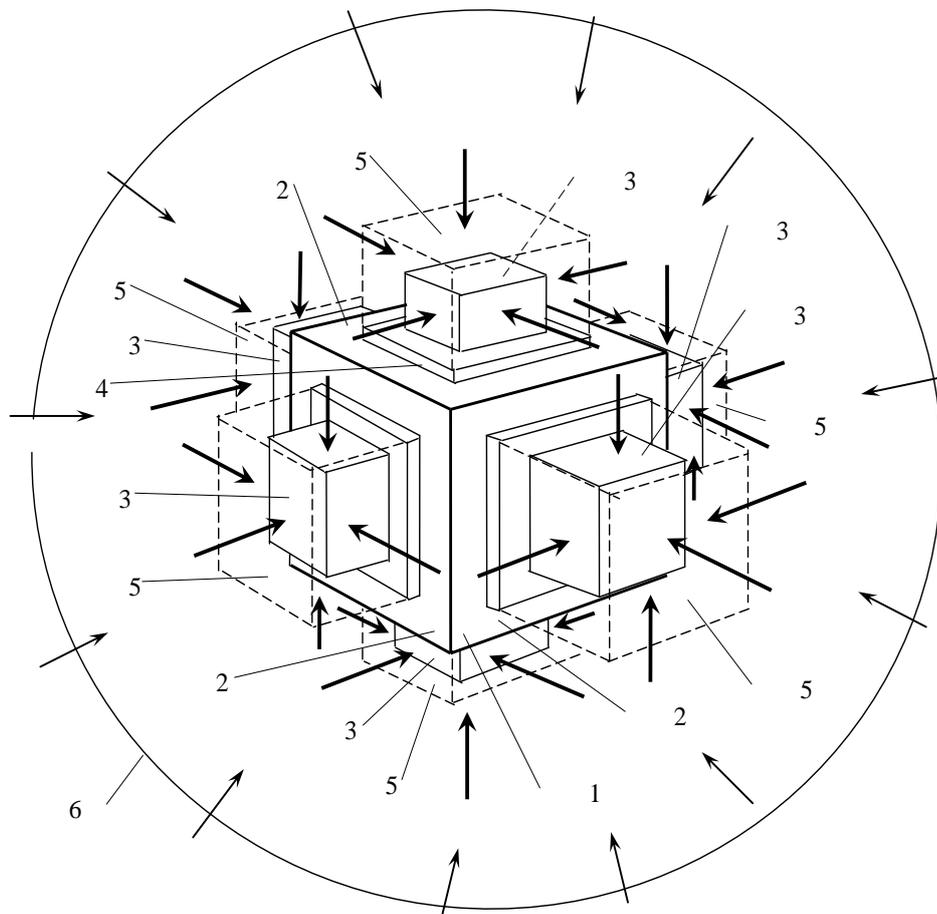


Рис. 5. Модель носителя с многовариантностью многосторонней, многоинструментальной и многоместной обработки относительно граней его корпуса

При количестве боковых граней, равном шести, имеем шесть рабочих зон (5). Зона многоинструментального воздействия образует сферу (6) моделирования направлений многосторонней, многоместной обработки деталей на боковых гранях корпуса носителя [9]. Жирными стрелками показаны направления инструментального воздействия при обработке деталей. В данной постановке для RMS говорим о многовариантных схемах многоинструментальной, многоместной и многосторонней обработки деталей на нескольких гранях носителя, обращенных к группе инструментов на рабочей позиции. При этом верно равенство:

$$\Omega(x,y,z) = \sum_{k=1}^N (x_k, y_k, z_k, P_k^n, t_k^n) \quad (4),$$

где N – количество возможных схем нагружения, k – соответствующая данному варианту многосторонней обработки схема нагружения носителя. Выражение (4) означает, что любое пространство силового нагружения $\Omega(x,y,z)$ определяется индивидуальным сочетанием результирующих сил резания P_k , временем их воздействия на корпус носителя t_k с координатами (x_k, y_k, z_k) и направлением их действия. Множество схем многосторонней обработки и нагружений носителя образовано вариантностью параметров $(x_k, y_k, z_k, P_k^n, t_k^n)$.

Действием сил резания $P_k = \{P_k^n\} = P_{yz}$ грань корпуса носителя получает упругое смещение на величину $\varepsilon_{экв}$ и прилегающие к ребрам элементы смежных ребер поворачиваются на угол, меняющийся по длине ребра. Рассматривая пространственную модель носителя в виде коробки (рис. 6), крутящий момент $M_{кр}$ при переходе от пространственной системы к плоской меняет плоскость своего действия и превращается в изгибающий момент M_u , действующий в плоскости каждой смежной пластины.

Исследования показали, что применение на гранях корпуса носителя плит способствует существенному повышению его жесткости [9], при этом каждая нагруженная грань получает смещение на величину $\varepsilon_{экв}$.

В этой связи важным методологическим аспектом проектирования схем многосторонней обработки деталей на RMS является необходимость контроля и управления процессом силового нагружения для обеспечения баланса жесткости носителя. Необходимо осуществлять контроль значений упругих деформаций, эквивалентных напряжений и учитывать их влияние на точность обработки деталей, установленных на боковых гранях носителя [9; 12].

В соответствии с этим предложена структурная схема управления параметрами, определяющими характер силового воздействия на носитель при многосторонней обработке деталей, с учетом их точности (рис. 7).

Осуществляется управление процессом многосторонней обработки деталей $\{W_i\}$, где выходными являются

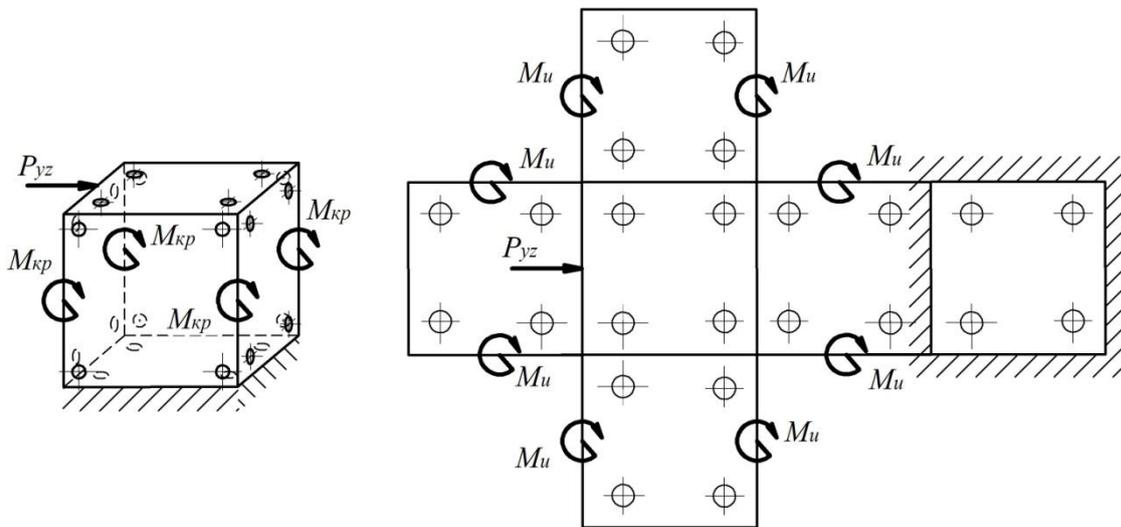


Рис. 6. Расчетная пространственная модель корпуса носителя



Рис. 7. Структурная схема управления процессом силового нагружения и обеспечения точности обработки

параметры точности обработки Y_{i2} и силовых деформаций Y_{i1} носителя. При многосторонней обработке деталей под действием сил резания возникают силовые смещения и деформации корпуса носителя Y_{i1} и, как следствие, снижение точности обработки до величины Y_{i2} . В результате получаем параметры Y_{i1} , Y_{i2} , на множестве которых осуществляется выбор, расчет, корректировка входных параметров X_i многосторонней обработки деталей.

Развитие RMS основано на перекомпоновке рабочей позиции, где в качестве узла базирования и транспортировки деталей применяют автоматически узлы призматической формы (носители). Многосторонняя обработка деталей на носителе характеризуется многовариантностью взаимного расположения инструмента относительно установленной на носителе обрабатываемой детали.

В работе показано:

1. Влияние параметров базирования носителя на точность обработки детали. Данный аспект является определяющим для реализации многосторонней обработки деталей на носителе.

2. Влияние силовых смещений корпуса носителя на точность многосторонней обработки деталей как следствие наложения переменных внешних силовых факторов механической обработки. Это позволило определить силовые факторы и говорить об исследовании вариантов схем пространственного нагружения корпуса носителя.

3. Переменный характер силового нагружения корпуса носителя как аспекта, определяющего переменный характер возникающих силовых смещений при многосторонней обработке деталей. Таким образом, совместное рассмотрение представленных аспектов обеспечения жесткости и точности базирования носителей позволит решить задачи обеспечения точности многосторонней обработки деталей в RMS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев В.И., Левашкин Д.Г., Селиванов А.С. Автоматизация гибридных и комбинированных технологий на основе модернизации станочного оборудования и выбора кинематических связей // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 70–74.
2. Платов С.И., Дема Р.Р., Зотов А.В. Модель формирования толщины плакированного слоя на деталях пар трения технологического оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 1. С. 69–72.
3. Бойченко О.В., Драчев О.И., Гранченко Д.В. Экспериментальное исследование процессов виброобработки // Проведение научных исследований в области машиностроения : сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Т. 2. Тольятти, 2009. С. 134–135.
4. Царев А.М., Самарцев И.А. Способ многоярусного компонования и перекомпонования рабочей позиции автоматической линии и перекомпонованная рабочая позиция автоматической линии для реализации способа : патент РФ № 2487004, заявка 2011108821/02, 09.03.2011.
5. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies // International journal of manufacturing technology & management. 2000. Vol. 1. P. 113.
6. Mustapha N., Daoud A-K., Wassy I.S. Availability modeling and optimization of reconfigurable manufacturing systems // Journal of quality in maintenance engineering. 2003. Vol. 9. № 3. P. 284–302.
7. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing // Journal of intelligent manufacturing. 2000. Vol. 11. № 11. P. 403–419.
8. Pérez R., Dávila O., Molina A., Ramírez-Cadena M. Reconfigurable micro-machine tool design for desktop machining micro-factories // 7th IFAC conference on manufacturing modelling, management, and control. Saint Petersburg, 2013. P. 1417–1422.
9. Царев А.М., Левашкин Д.Г. Перекомпоновываемые производственные системы реконфигурируемого производства. Обеспечение жесткости автоматически сменных узлов призматической формы. М.: Спутник+, 2007. 304 с.
10. Царев А.М., Левашкин Д.Г. Многоместное приспособление-спутник : патент РФ № 2258593, заявка 2003127477/02, 10.09.2003.
11. Матвеев В.В. Размерный анализ технологических процессов. М.: Машиностроение, 1982. 264 с.
12. Левашкин Д.Г. Системы автоматического контроля. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2007. 163 с.

REFERENCES

1. Malishev V.I., Levashkin D.G., Selivanov A.S. Automation of hybrid and mixed technologies on the basis of machinery rebuilding and selection of kinematical connections. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 70–74.
2. Platonov S.I., Dema R.R., Zotov A.V. The pattern of plate thickness formation on the parts of processing equipment friction couples. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2013, no. 1, pp. 69–72.
3. Boychenko O.V., Drachev O.I., Granchenko D.V. Field research of vibro-processing. *Provedenie nauchnih issledovaniy v oblasti mashinostroeniya* [Carrying out of scientific investigation in machine building: the digest of All-Russian scientific and technical conference]. Vol. 2. Tolyatti, 2009, pp. 134–135.
4. Tsarev A.M., Samartsev I.A. *Sposob mnogoyarusnogo komponovaniya i perekomponovaniya rabochey pozitsii avtomaticheskoy linii i perekomponuemaya rabochay pozitsiya avtomaticheskoy linii dlya realizatsii sposoba* [The method of multilevel packaging and repackaging of the automatic transfer line active position and the repackageable automatic transfer line active position for the method implementation]. Patent RF, no. 2487004, 2011.
5. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. *International journal of manufacturing technology & management*, 2000, vol. 1, pp. 113.

6. Mustapha N., Daoud A-K., Wassy I.S. Availability modeling and optimization of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of quality in maintenance engineering*, 2003, vol. 9, no. 3, pp. 284–302.
7. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. *Journal of intelligent manufacturing*, 2000, vol. 11, no. 11, pp. 403–419.
8. Pérez R., Dávila O., Molina A., Ramírez-Cadena M. Reconfigurable micro-machine tool design for desktop machining micro-factories. *7th IFAC conference on manufacturing modelling, management, and control*, Saint Petersburg, 2013, pp. 1417–1422.
9. Tsarev A.M., Levashkin D.G. *Perekomponuemie proizvodstvennie sistemi rekonfiguriruemogo proizvodstva. Obespechenie jestkosti avtomaticheskimi smennih uzlov prizmaticheskoy formi* [Repackageable manufacturing systems of reconfigurable production. The assurance of stability of auto-replaceable prismatic shaped assemblies]. Moscow, Sputnik+ publ., 2007, 304 p.
10. Tsarev A.M., Levashkin D.G. *Mnogomestnoe prisposoblenie-sputnik* [Multiple jig-pallet]. Patent RF, no. 2258593, 2003.
11. Matveev V.V. *Razmerniy analiz tehnologicheskikh protsessov* [Dimensional analysis of processing]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982, 264 p.
12. Levashkin D.G. *Sistemi avtomaticheskogo kontrolya* [Automatic control systems]. Tolyatti, TSU publ., 2007, 163 p.

**METHODOLOGICAL ASPECTS OF ASSURANCE OF ACCURACY AND STABILITY
OF RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEMS USING AUTO-REPLACEABLE ASSEMBLIES**

© 2014

D.G. Levashkin, candidate of the technical sciences,
Assistant professor of the Department «Equipment and Technologies of Mechanical Engineering»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: reconfigurable manufacturing systems; auto-replaceable assembly; transfer line pallet; flexible manufacturing system; multisided processing of parts; accuracy; stability.

Annotation: The article covers the issues of assurance of accuracy and stability of parts processing using the auto-replaceable assemblies and the repackaging of active position of reconfigurable manufacturing systems. The summing influence of auto-replaceable assemblies locating accuracy and their body stability on the accuracy of multisided processing of parts is demonstrated. To solve the issues of multisided processing of parts the author suggested the model of auto-replaceable assembly – carrier of parts for simulation of the issues of locating accuracy and carrier body stability assurance in active position of configurable manufacturing system. The author gives the design of a carrier made in the form of right prism on the lateral faces of which the basing holes are located, and the installation of the tool set and a part is carried out on each face. This construction assures the dimensional repetitive accuracy of the parts location relative to production assemblies of the active position and the equal carrier body stability in directions of multisided processing of the parts. The article describes the model of the system of equally spaced basing holes for simulation of carrier location accuracy. The effect of relative position of each carrier basing hole on the accuracy of the part processing is shown on the base of dimensional analysis. This aspect is determinant for carrying out multisided processing of the parts on the carrier. It was proved that the accuracy of multisided processing of the parts depends on the forced displacements of the carrier body arising due to overlap of variables of external force factors of machine processing. The author carried out the analysis of variety of force actions directions that allowed to determine the force factors and to speak about the study of optional designs of dimensional loading of the carrier body. The author considered the variable type of force loading of the carrier body as the aspect specifying the variable type of arising forced displacements during multisided processing of the parts. Thus, joint considering of proposed aspects of stability and locating accuracy assurance will allow to solve the problem of assurance of accuracy of multisided processing of parts on the carriers.