

УДК 004.9+004.8+621.9

CAD/CAM/CAE системы, OMW-технологии и нейросетевые алгоритмы анализа данных на предприятиях авиастроительной отрасли

Чигринец Е.Г.*, Верченко А.В.

*Ростовский вертолетный производственный комплекс
ПАО «Роствертол» им. Б.Н. Слюсаря, ул. Новаторов, 5,
Ростов-на-Дону, 344038, Россия*

**e-mail: egchigrinets@gmail.com*

Аннотация

В работе представлен опыт использования CAD/CAM/CAE систем и OMW-технологий для решения инженерных задач в ходе технологической подготовки производства деталей авиационных конструкций. Представлены возможности применения элементов искусственного интеллекта на базе нейронных сетей в качестве средств анализа и прогнозирования качества механической обработки высокопрочных полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: CAD/CAM/CAE системы, OMW-технологии, адаптивная механическая обработка, искусственные нейронные сети.

Введение

Рост глобальной конкуренции и высокие требования к производимым товарам и услугам обозначили направления цифровой трансформации экономики Российской Федерации. Значительное влияние на темпы перехода страны на

инновационные рельсы развития оказывает авиационная промышленность как одна из наиболее наукоемких отраслей, играющих системообразующую роль. Кроме того, авиастроение является важнейшим элементом обеспечения интересов РФ в оборонной и военно-политической сфере, а также важным фактором поддержания суверенитета страны.

Руководствуясь государственной программой «Цифровая экономика Российской Федерации» (распоряжение Правительства №1632-р от 28.02.2017), где одними из основных сквозных цифровых технологий отмечены «новые производственные технологии» и «нейротехнологии и искусственный интеллект», выполнен анализ производственных проблем изготовления вертолетной техники на предприятии, тормозящих рост производительности труда и снижающих качество готовой продукции. Поставлены задачи, которые могут быть решены внедрением в производство элементов искусственного интеллекта на базе нейросетей и применением перспективных технологий в подготовке производства деталей вертолетной техники.

Применение САД систем в конструкторско-технологической подготовке производства деталей авиационных конструкций

Существует постоянная взаимосвязь между конструкцией летательного аппарата и технологией его изготовления. При конструировании ввиду высоких требований к надежности изделия руководствуются условием максимальной прочности при минимальной массе. В результате большинство деталей вертолета имеют сложную форму и небольшую жесткость. Так как окончательная жесткость

конструкции достигается только в результате сборки изделия, значительное внимание уделяется технологической подготовке процесса механической обработки деталей малой жесткости и сложной формы.

Значительная часть изделий авиастроения изготавливается плазово-шаблонным методом. В настоящее время возникает острая потребность перехода с физической модели изделия (макета, плаза) на математические, которые пригодны для реализации технологических процессов формообразования на оборудовании с числовым программным управлением.

Одним из примеров таких деталей является стойка пылезащитного устройства (ПЗУ) вертолета (рис.1,а). Рассматриваемая деталь имеет сложную нелинейную геометрию, предопределяющую выбор станков с ЧПУ для ее формообразования. Формирование программы для станков с ЧПУ в САМ модуле требует создания трехмерной модели в используемой предприятием САД системе. Для снятия геометрической информации с физической модели детали использовалась контрольно-измерительная машина (КИМ) Global Image 3d. Результаты обмера представлены на рис. 1,б.

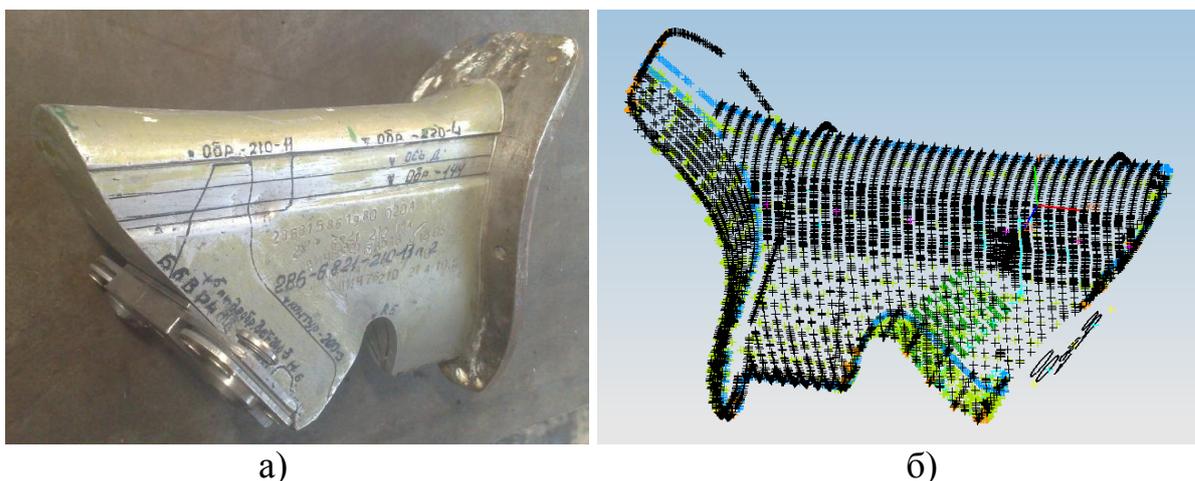


Рис. 1 Стойка ПЗУ: а) физическая модель; б) результаты снятия геометрической информации с физической модели

В ходе анализа снятой геометрической информации с физической модели было выявлено, что значительное количество замеров получено с погрешностями. По этой причине построение математической модели основывалось на идентификации функциональной модели для каждого сечения после исключения выбросов.

В качестве аппроксимирующей функции выбиралась полиномиальная модель (1) для каждого сечения Z :

$$Y(x) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x^{i-1}, \quad (1)$$

Для сложных сечений модель идентифицировалась на нескольких интервалах и записывалась в виде (2), причем для каждого сечения $Z = \text{constant}$:

$$Y(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n a_i \cdot x^{i-1} & x_0 \leq x \leq x_1 \\ \sum_{j=1}^n b_j \cdot x^{j-1} & x_1 \leq x \leq x_2, \\ \sum_{k=1}^n c_k \cdot x^{k-1} & x_2 \leq x \leq x_3 \\ \dots & \dots \end{cases}, \quad (2)$$

В качестве критерия оценки точности идентифицированных моделей использовалась норма Гаусса.

В дальнейшем полученные модели подготавливались для сшивания – задавались уравнения касательных на граничных точках интервала аппроксимации (рис. 3), и экспортировалось в различные CAD системы, возможности которых позволяют задавать функциональные трехмерные модели напрямую (т.е. параметрически) или через инструменты сплайновой геометрии (рис. 4).

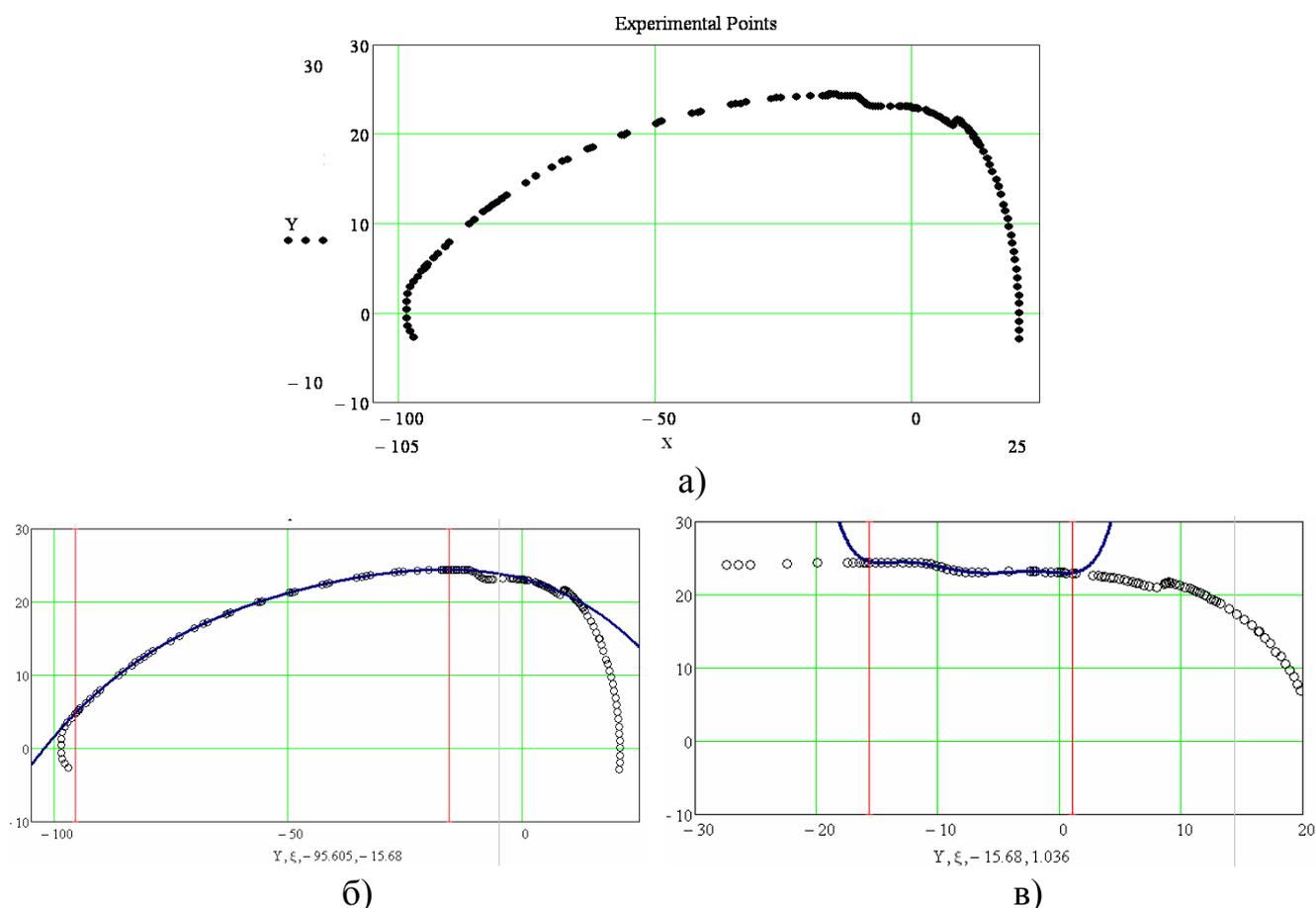


Рис. 2 Пример моделирования сечения: а) экспериментальные точки; б) эмпирическая функциональная модель для интервала $-95.6 < x < -15.68$; в) эмпирическая функциональная модель для интервала $-15.68 < x < 1.03$

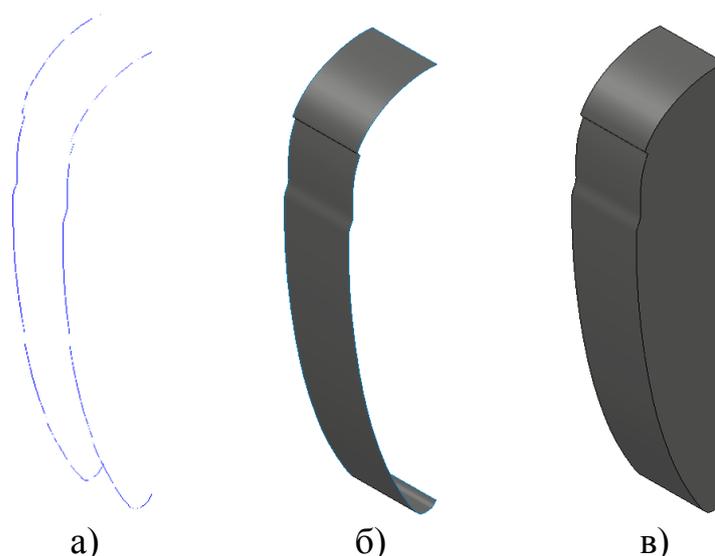


Рис. 3 Пример создания 3-d модели фрагмента детали по двум сечениям: а) геометрия сечений; б) формирование оболочки по сечениям; в) формирование твердотельной модели

Применение САМ систем и концепции ОМV измерений с целью реализации технологии адаптивной механической обработки особо ответственной детали вертолета

Большинство деталей ЛА имеют сложную пространственную геометрию с высокими требованиями к взаимному расположению механически обрабатываемых элементов. В связи с этим в авиационном производстве большое внимание уделяется разработке управляющих программ (УП) для 4-х и 5-ти координатных обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ). УП формируются в САМ системе по твердотельным трехмерным моделям с учетом сложной геометрии обрабатываемых поверхностей, обуславливающую особенность базирования, закрепления детали и конструкции оснастки, а формирование траектории движения инструмента выполняется с учетом стратегии обработки отдельных поверхностей, зон малой жесткости деталей и зон обхода инструмента.

Изменение в области координатно-измерительного оборудования, которое непосредственно затрагивает производственный процесс и механическую обработку в частности, связано с появлением измерительных головок, устанавливаемых в шпиндель ОЦ вместо режущего инструмента. Это привело к бурному развитию технологий OMV (от англ. on-machine verification) – контролю точности обработанной детали непосредственно на станке. Использование САМ систем совместно с OMV измерениями открывает широкие возможности для практической реализации технологии виртуального базирования, когда в стойку ЧПУ вносятся угловые и линейные поправки, учитывающие фактическое положение литейной (и/или ковальной) заготовки, не имеющей явных технологических баз, с целью обеспечения равномерности распределения припуска на обработку и минимизации брака. Как результат, формируемые управляющие программы обладают свойством «адаптивности» – траектории инструмента рассчитываются с учетом фактической формы и положения обрабатываемой заготовки на каждом конкретном установе.

Авторами программно реализован процесс адаптивной лезвийной обработки с применением виртуального базирования особо ответственной детали вертолета «Корпус рукоятки», изготавливаемой из труднообрабатываемой стали ВНЛ-3. Главной проблемой серийного внедрения детали является отсутствие явных технологических баз, обеспечивающих повторяемость и качественное изготовление деталей. Кроме того, литейные заготовки имеют значительный разброс величин припусков на механическую обработку даже в рамках одной партии. Установив деталь в приспособление и определив нулевую точку $O_0 (X_0 Y_0 Z_0)$ управляющей

программы, на второй и последующих заготовках партии ноль детали (O_1) будет иметь совершенно другие координаты ($X_1 Y_1 Z_1$) (рис. 4).

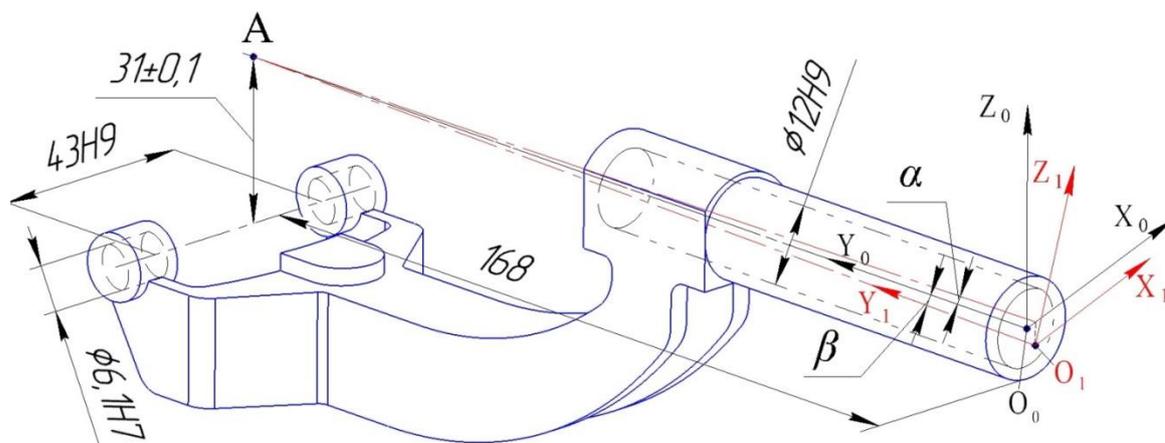


Рис. 4 Ноль детали «Корпус рукоятки»: O_0 – теоретическое положение, O_1 – реальное положение

Неверное расположение заготовки относительно нулевой точки в процессе механообработки приводит к неисправимому браку – смещению обработанных поверхностей относительно необрабатываемых на величину, превышающей допуск (рис. 5).

Для преодоления возникших трудностей было принято решение использовать виртуальное базирование данной заготовки, т.е. внесение поправок в нулевую точку управляющей программы механической обработки под конкретное положение заготовки. Геометрически поставленная задача может быть решена проецированием нулевой точки O_1 (см рис. 4) на плоскости YZ (точка O_1^*) и XY (точка O_1^{**}) с последующем определением угловых поправок (α , β) относительно теоретически необходимого положения (рис. 6).

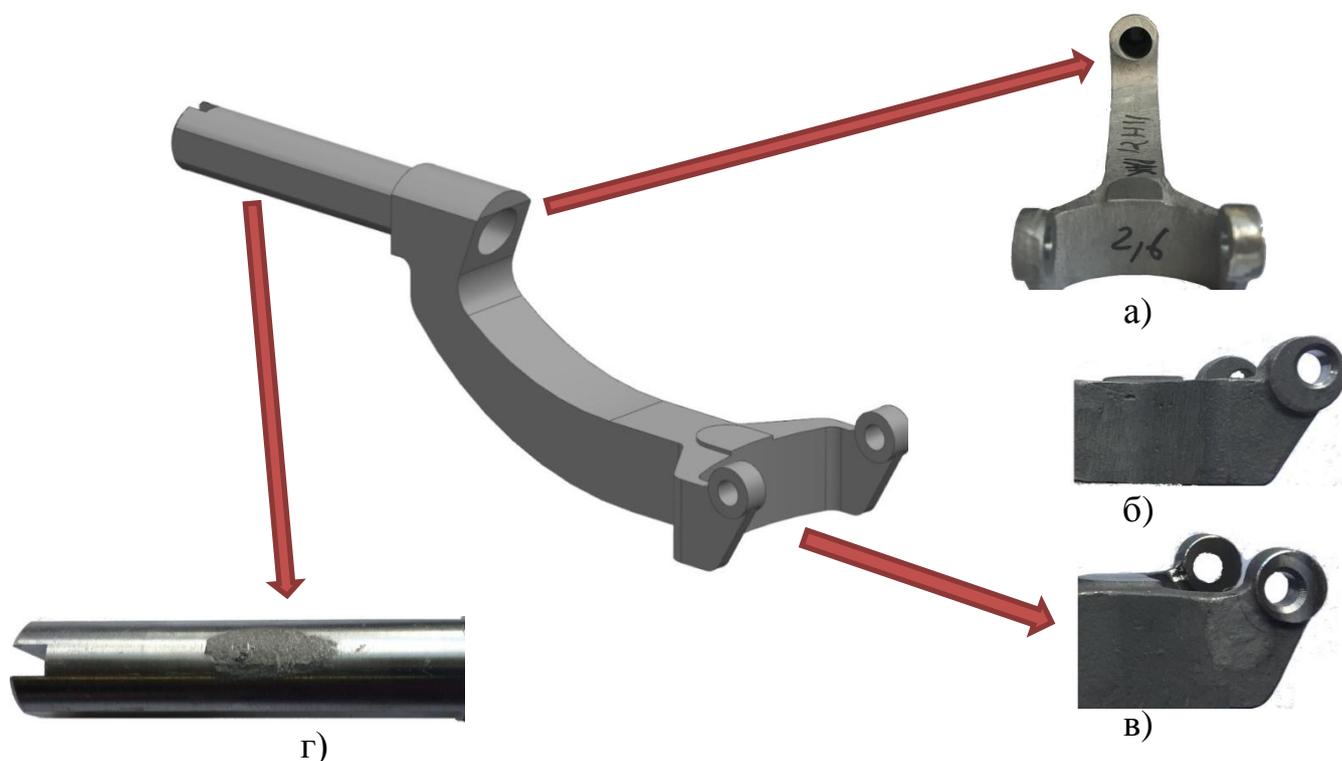


Рис. 5 Дефекты механической обработки детали «Корпус рукоятки»: а – смещение отверстия $\text{Ø}12\text{H}9$, б – смещение отверстия $\text{Ø}6,1\text{H}7$ в прямом направлении, в – смещение отверстия $\text{Ø}6,1\text{H}7$ в обратном направлении, г – недообработанный участок на чистовой поверхности

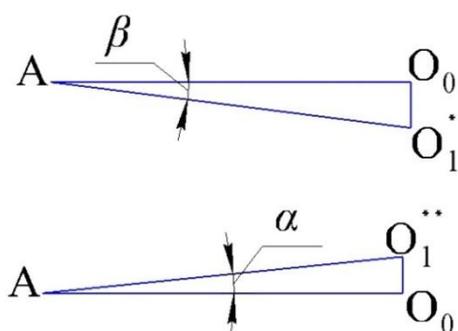


Рис. 6 Определение угловых поправок нулевой точки O_1 относительно теоретической точки O_0 : AO_0 – теоретическая ось детали, AO_1^* – проекция AO_0 на плоскость YZ , AO_1^{**} – проекция AO_0 на плоскость XY , α – угловая поправка координаты X , β – угловая поправка координаты Y

Значения углов могут быть вычислены по формулам (3) и (4):

$$\alpha = \arctg\left(\frac{O_0O_1^{**}}{AO_0}\right); \quad (3)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{O_0O_1^*}{AO_0}\right) \quad (4)$$

Для определения угловых поправок методом параметрического программирования разработана подпрограмма измерения, с помощью которой

выполнялся обмер заготовки в контрольных точках с последующим пересчетом ее положения относительно теоретически необходимого по представленным выше формулам. Координаты контрольных точек определены измерительным датчиком Renishaw, которым оснащен обрабатывающий центр. Элемент подпрограммы измерения, реализуемой на ОЦ, представлен на рис. 7.

Еще одним несомненным достоинством ОМВ-технологий является не только осуществление процедуры виртуального базирования, но и возможность перераспределения припуска литейных и/или штампованных деталей для обеспечения «вписываемости» механической обработки в заготовку, изготовленную вне предела допуска. Поясним это на примере ранее рассмотренной детали «Корпус рукоятки». Так часть заготовок данных деталей имеют искривленную цилиндрическую часть (рис. 8).

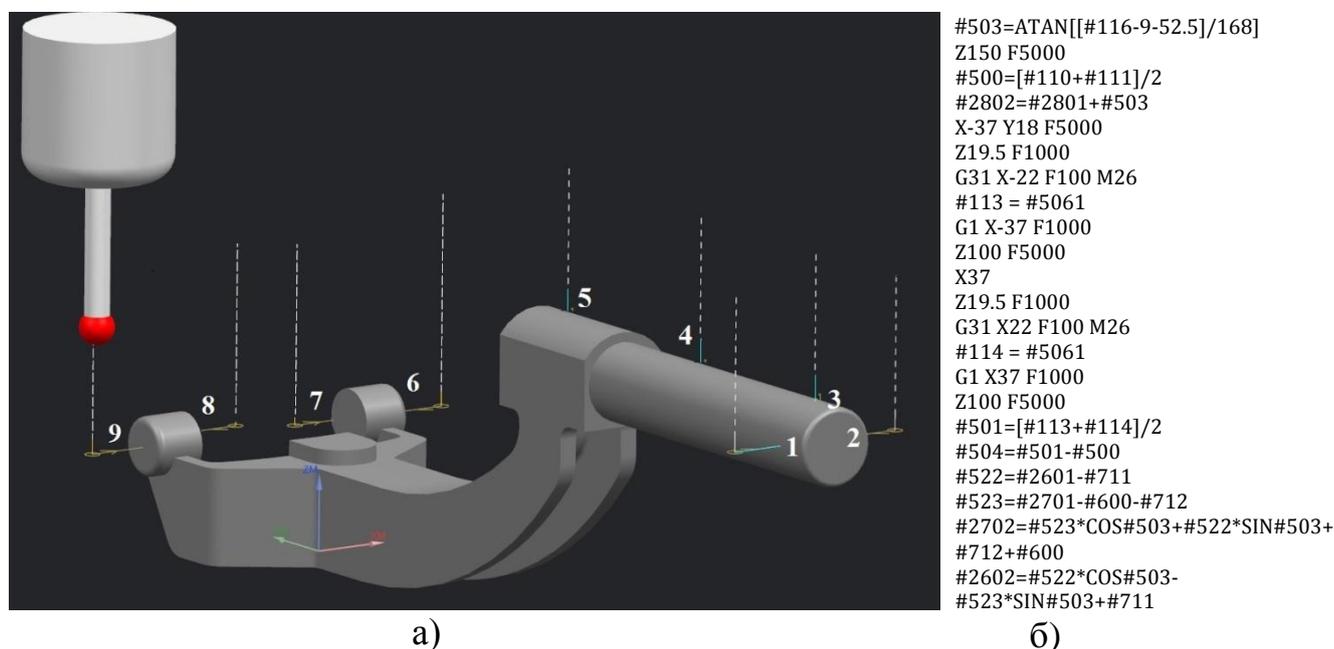


Рис. 7 Определение реального положения заготовки в приспособлении: а) элемент траектории движения измерительного датчика, б) элемент программного кода движения датчика и пересчета положения заготовки

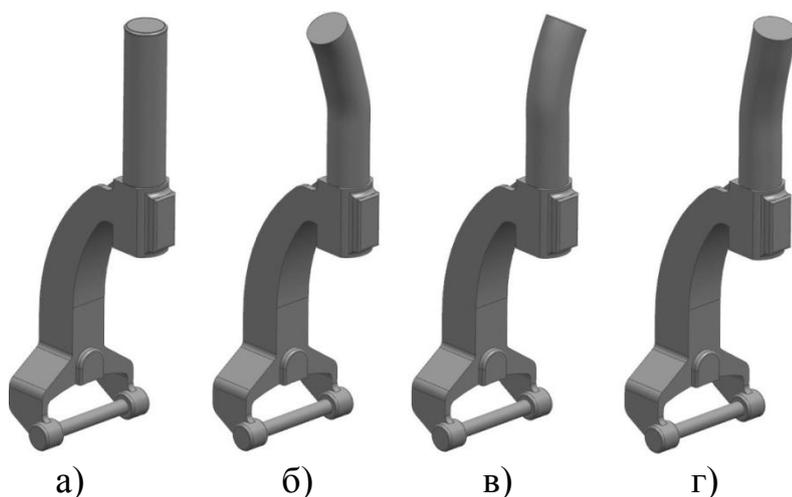


Рис. 8 Заготовка детали «Корпус рукоятки»: а – идеальная заготовка; б,в,г – варианты искривления цилиндрической части в одной или двух плоскостях (величина кривизны показана условно для большей наглядности)

Величина кривизны делает невозможным получение годных деталей даже с применением процедуры виртуального базирования. С другой стороны, искривление рукоятки проблематично определить визуально или с помощью стандартных средств измерения, а применения стационарных КИМ для обмера всей партии заготовок по производственным причинам и, учитывая большие объемы партий, не представляется возможным. Поэтому данный дефект выявляется уже на заключительных операциях механической обработки, когда поправки в нулевую точку внесены, а на детали имеются недообработанные места (рис. 5, г). Это ведет к увеличению процента бракованных деталей, снижению производительности труда, росту технологических издержек производства, что негативно сказывается на конкурентоспособности готовой продукции.

С учетом этого в код подпрограммы измерения заложены функции, команды и условные операторы, которые по результатам обмера заготовки вносят такие поправки в нулевую точку, которые перераспределяют припуск на механическую обработку с учетом кривизны цилиндрической части «корпуса рукоятки». Другими

словами мы смещаем припуск в сторону возможного образования «черных» мест на обработанных поверхностях (см. рис.5, г). В случае больших значений искривлений (припуска недостаточно для его исправления) на стойку ЧПУ выводится предупреждение, что обрабатывать данную деталь не нужно, т.к. будет брак.

Процесс разработки подпрограмм ОМВ-измерений и операций адаптивной механической обработки достаточно сложен, уникален для каждой конкретной детали и требует глубоких знаний в области параметрического программирования, однако окупает все трудозатраты уже в рамках изготовления первой партии деталей. Так разработанный авторами технологический процесс с применением адаптивной механической обработки детали «корпус рукоятки» позволил сократить машинное время работы ОЦ на 25%, количество брака на 90%, а расход режущего инструмента на 40%, что подтверждено актом промышленных испытаний.

Особенности использования САМ/САЕ систем в ходе разработки

технологического процесса механической обработки деталей малой жесткости

Ограниченная жесткость большинства деталей вертолета вызвала необходимость моделирования их упругих деформаций в процессе обработки. Такое моделирование осуществляется в системах конечноэлементного моделирования (САЕ) [1].

Примером таких задач может служить оптимизация конструкции заготовки, конструкции оснастки и режимов обработки деталей сложной геометрии и малой жесткости. При этом траектории движения инструмента, созданные в САМ модуле, 3-D модели детали, заготовки и оснастки являются исходными данными для

моделирования. В ходе конечноэлементного моделирования определяются зоны максимальных напряжений и деформаций для дальнейшего внесения коррекций в конфигурацию заготовки, режимы резания, реализацию схемы базирования и т.д.

В качестве примера рассмотрим конструкцию детали «Наконечник» (рис. 9), обеспечивающего надежное соединение лопасти несущего винта вертолета с ротором, оснащенный автоматом перекоса

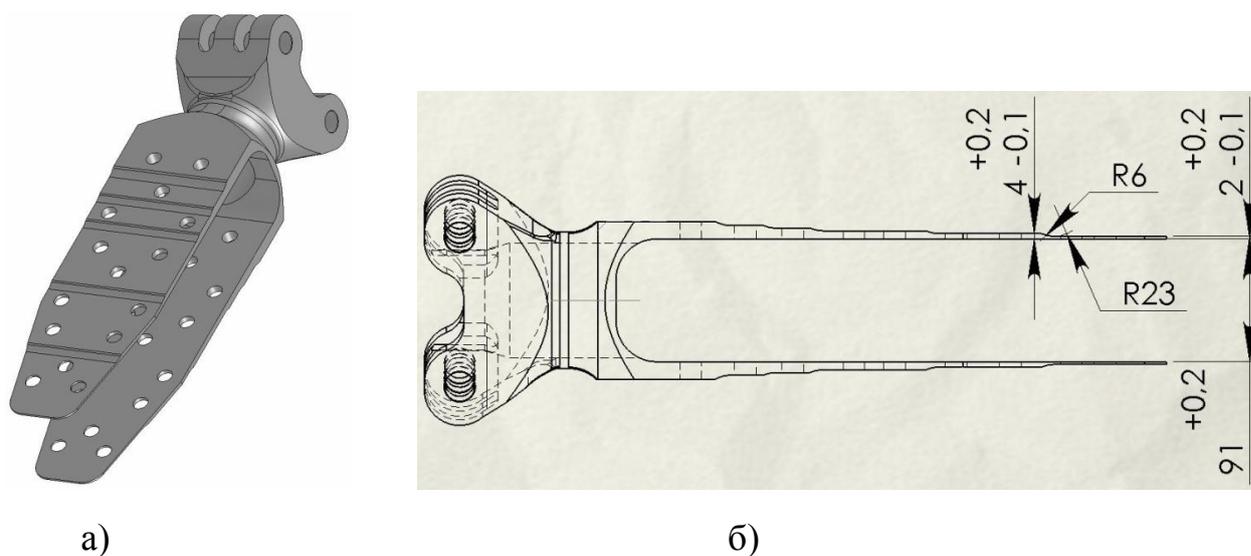


Рис. 9 Конструкция «Наконечника»: а) 3-d модель; б) размеры наименее жесткого элемента конструкции.

Наибольшие трудности вызывает проектирование механической обработки ступенчатой поверхности «Наконечника» уменьшающейся до толщины 2мм с полем допуска 0,3 мм. Использование для обработки ступенчатой поверхности опоры и прижимов не позволяют произвести обработку с одного установка и имеет еще ряд других недостатков.

Для решения поставленной задачи было предложено отказаться от заготовки, максимально приближенной по форме и размерам к детали и разработать конструкцию заготовки с рядом дополнительных технологических припусков,

позволяющих увеличить жесткость конструкции, совместить конструкторскую и технологическую размерные базы, а также обеспечить обработку наибольшего количества поверхностей с одной установки (рис. 10, а).

Используя одну из применяемых на предприятиях САМ систему, были разработаны управляющие программ для станков с ЧПУ и определены геометрия полуфабриката детали «Наконечник», направления, точки приложения и величины сил резания в сформированной системе СПИД (станок – приспособление – инструмент - деталь) (рис.10, б).

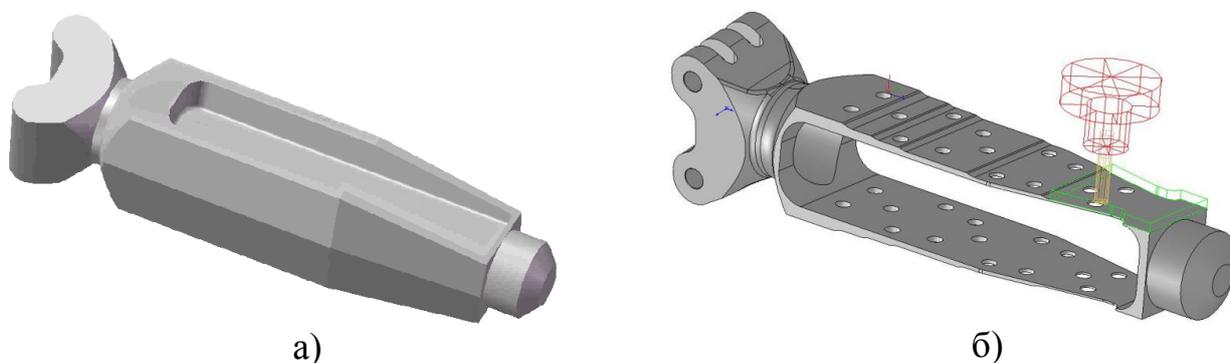


Рис. 10 Деталь «Наконечник»: а) 3-d модель заготовки, б) Пример определения взаимного расположения обрабатываемой детали «Наконечник» и режущего инструмента с оправкой

Полученные в ходе разработки в САМ системе управляющей программы для станка с ЧПУ трехмерные модели полуфабрикатов, схемы базирования и их реализации, а также величины, направления и точки приложения сил резания легли в основу конечноэлементного моделирования напряженно-деформируемого состояния «Наконечника» (рис. 11).

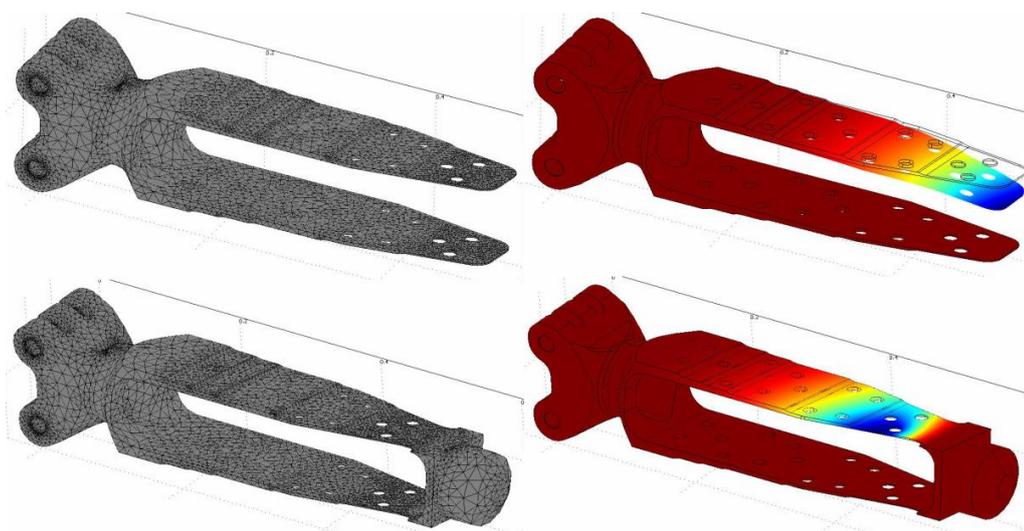


Рис. 11 Результаты конечноэлементного моделирования деформации детали «Наконечник» под действием осевой силы резания.

Полученные результаты показали (таблица 1), что деформации модели заготовки без технологических припусков значительно превышают величину поля допуска на размер, обрабатываемой поверхности. Для заготовки с технологическими припусками только при величине осевой силы резания менее 100 Н деформации укладываются в поле допуска на размер. Однако, принимая во внимание тот факт, что помимо погрешностей обработки, вызванных упругими деформациями, в ходе механической обработки детали присутствуют и другие статические и динамические погрешности, имеющие другую природу, было принято решение на последних чистовых проходах уменьшить расчетную силу резания до 50 Н.

Таблица 1

Численные значения результатов конечноэлементного моделирования деформации детали «Наконечник» под действием осевой силы резания

Сила резания (осевая)	Деформация модели	
	с технологическими припусками	без технологических припусков
100 Н	0.226 мм	2.737 мм
50 Н	0.113 мм	1.369 мм

Применение элементов искусственного интеллекта в технологической подготовке производства деталей из полимерных композиционных материалов

Актуальным направлением развития научно-технического прогресса в авиастроении является применение новых материалов, таких как полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродных и стеклянных волокон – углепластики и стеклопластики, которые наряду с повышением прочности и коррозионной стойкости изделия, позволяют добиться существенного снижения массы летательного аппарата [5, 19, 20].

Наиболее опасные и часто встречаемые дефекты механообработки ПКМ – расслоения, которые возникают в местах входа/выхода инструмента и снижают усталостную долговечность, прочность, эксплуатационную надежность изделия и интенсифицируют влагопоглощение [7-13, 15-18].

Результатом серии опытов по определению зависимости размеров дефектов отверстий – расслоений от режимов обработки стали матрицы данных (5), которые для удобства последующего использования необходимо было преобразовать в эмпирические модели, обеспечивающие возможность предсказания дефектов и выбора рациональных режимов. Традиционно для этих целей используются регрессионные одно-, двух- и многофакторные модели первого или второго порядка (авторы использовали градиентные методы нелинейной оптимизации). Однако, дискретность свойств ПКМ приводит к значительному разбросу размеров дефектов и их доверительных интервалов, получаемых в результате статистической обработки даже многократного повторения экспериментов. Эти зависимости

качественно правильно отражают характер изменения размеров расслоений от режимов обработки, однако, не позволяют описать тонкие, но практически важные количественные особенности зависимостей размеров дефекта от режимов процесса при использовании инструментов с различной геометрией [2, 4].

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} & x_{18} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} & x_{27} & x_{28} \\ \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n4} & x_{n5} & x_{n6} & x_{n7} & x_{n8} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $x_{n1} - x_{n8}$ – столбцы скоростей резания, подачи и расслоений для трех типов инструментов

Для преодоления обозначенных выше проблем исследована возможность разработки и обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) в качестве моделей, обеспечивающих адекватный прогноз качества процессов сверления высоконагруженных авиационных конструкций из ПКМ [6, 14, 21].

На каждый вход нейрона подается сигнал x_i , при этом с каждым входом связан синаптический вес w_i . В теле нейрона с помощью взвешенного сумматора (6) вычисляется функция отклика (7), т.е. реализуется нелинейное отображение многомерного пространства входов R^n в скалярный выход R^1 .

$$NET = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (6)$$

$$OUT = F(NET - \theta), \quad (7)$$

где x_i – входные сигналы, совокупность которых образует вектор x ; w_i – весовые коэффициенты, совокупность которых образует вектор весов w ; NET – взвешенная

сумма весов, значение которой передается на нелинейный элемент; θ – пороговый уровень данного нейрона; F – нелинейная функция активации; OUT – выходной сигнал.

В данном исследовании в разработке нейронной сети применялась сигмоидная функция активации в виде гиперболического тангенса (8).

$$OUT = th(NET) = \frac{e^{NET} - e^{-NET}}{e^{NET} + e^{-NET}} \quad (8)$$

Процедура, с помощью которой происходит настройка ИНС, называется алгоритмом обучения. В процессе обучения происходит адаптация синаптических весов и топологии нейронной сети так, чтобы выходные сигналы отвечали некоторому заранее заданному критерию качества. Обучение ИНС обладает свойством адаптивности, которое обеспечивает настройку весов в соответствии с характеристиками окружающей среды. Т.е. с изменением входных сигналов сеть в реальном времени «переучивается» применительно к новым условиям. Таким образом, ИНС можно рассматривать как черный ящик, который реализует отображение n -мерного вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ в m -мерный вектор $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$.

Так как в случае нейронной сети, моделирующей размеры дефектов в зависимости от режимов обработки, известны как входные сигналы – скорость резания и подача, так и выходные – величина расслоений, то в работе использовался алгоритм обучения с учителем методом обратного распространения ошибки. В процессе обучения сеть меняет свои параметры и учится давать нужное

отображение $x \rightarrow y$. Это означает, что должно быть задано множество пар векторов $\{x^s, d^s\}$, $s = 1 \dots S$, где $\{x^s\} = \{x^1, \dots, x^S\}$ - формализованное условие задачи, $\{d^s\} = \{d^1, \dots, d^S\}$ - известное решение для этого условия. Совокупность пар $\{x^s, d^s\}$ составляет обучающее множество. Необходимо учитывать, что количество элементов S в обучающем множестве должно быть достаточным для обучения сети, но строго не регламентируется. Перед построением нейронных сетей необходимо сформировать обучающие наборы. В качестве файла экспериментальных данных будем использовать матрицу (5), сформированную ранее.

Для повышения обучаемости будущих сетей и получения более точных результатов проведем виртуальные эксперименты в среде Mathcad. Виртуальные эксперименты представляют собой размножение экспериментальных данных при каждом наборе скоростей резания и подач внутри доверительных интервалов, определенных по результатам опытов.

Формирование обучающих наборов завершается выдачей двух переменных *Input* и *Output* в виде текстовых файлов. Переменная *Input* представляет собой наборы режимов обработки (скорость резания и подача), а *Output* соответствующие им значения расслоений.

Построение нейронных сетей выполнялось с помощью инструмента *Neural Network Fitting Tool* среды MATLAB [3]. После ввода входных данных в рабочее

поле проведем перераспределение всего обучающего набора на три случайно выбираемых подмножества данных:

1. Обучение, составляющего 70% данных всего обучающего набора.
2. Проверка валидности – 15% обучающего набора.
3. Тестирование качества аппроксимации – 15% обучающего набора.

Затем необходимо согласовать структуру сети. В выходном слое аппроксимации функции всегда один слой. Число нейронов во входном слое подбирается опытным путем и в нашем случае изменяется от 3 до 5. Критерий выбора – наиболее простая сеть, но адекватно описывающая процесс. После согласования структуры запускаем обучение сети, после которого можем ознакомиться с результатами в виде регрессионных линий (рис. 12).

Из рис. 12 значение коэффициента регрессии R превышает 0,97 (при приемлемом значении 0,9). Это означает, что более 97% предсказанных нейронной сетью результатов на этапах тренировки, валидации и тестирования совпадают со значениями обучающих данных и полученная сеть обладает достаточной точностью.

Далее для исследования работы создаваемых сетей используем Simulink модель-шаблон, которая генерирует массив нормально распределенных подач и скоростей резания, подавая их на вход сети. На выход нейронной сети подаются соответствующие режимам обработки значения расслоений. Симуляция оканчивается созданием точечной трехмерной диаграммы.

После того как ИНС научилась давать уже известные результаты, за счет способности к обобщению сетью могут быть получены новые результаты, если на

вход подать вектор, который не встречался при обучении. Так реализуется возможность нейронной сети предсказывать результаты экспериментов.

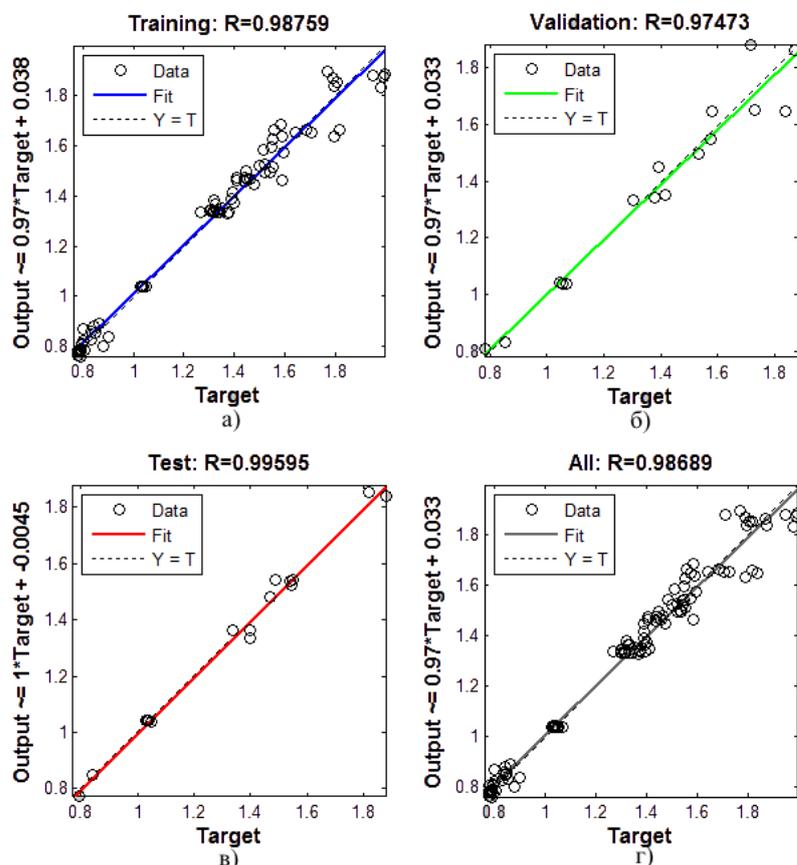


Рис. 12 Графики рассеяния обучающих данных от предсказаний нейронной сети на стадиях: а) тренировки, б) валидации, в) тестирования, г) всех данных

Изобразительные и прогнозные свойства разработанной архитектуры нейронной сети были исследованы при обработке серии экспериментов по исследованию качества получаемых отверстий в зависимости от скорости резания и подачи, а также сопоставлены с результатами, полученными методом сопряженных градиентов.

На рис. 13 представлены отклики нейронных сетей расслоений на входе в отверстие, зависящих от подачи при постоянной скорости резания. Так как модели, полученные из экспериментальных данных стандартными статистическими методами, показали недостаточно согласованный с экспериментом количественный

прогноз размера дефектов, ограничивающий их применение на практике, для прогнозирования размеров расслоений при сверлении отверстий в стеклопластике и углепластике рекомендовано использовать искусственные нейронные сети.

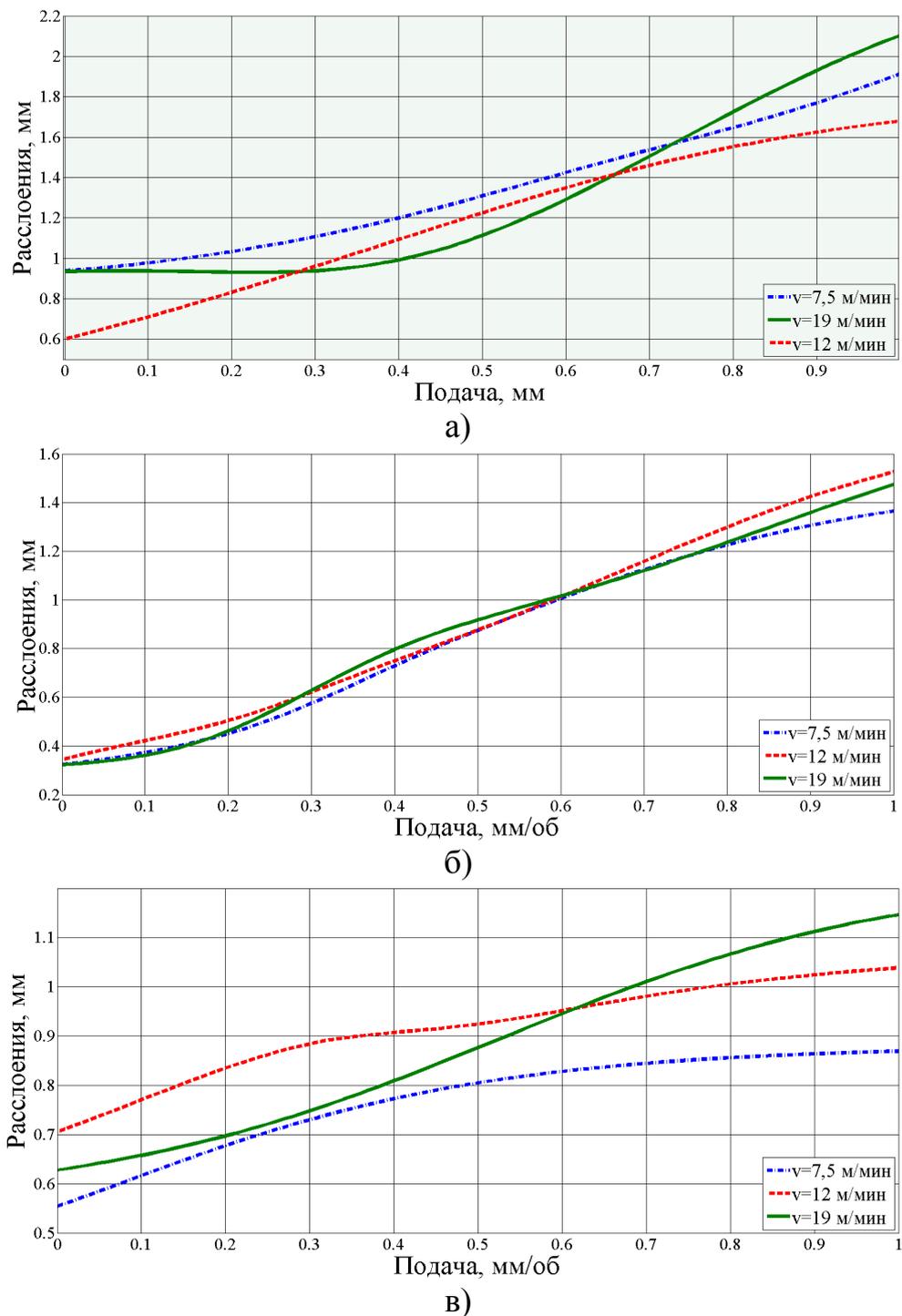


Рис. 13 Отклики ИНС расслоений, зависящих от подачи при постоянной скорости резания на выходе из отверстия: а) сверло тип 1, б) сверло тип 2, в) сверло тип 3

Заключение

В работе представлен системный подход к реализации конструкторско-технологической подготовки производства летательных аппаратов с применением цифровых технологий на предприятии ПАО «Роствертол». Теоретические исследования авторов базируются на основных положениях технологии машиностроения, теории вероятностей и математической статистики, теории нейронных сетей и градиентных методов нелинейной оптимизации.

Представлены математические методы с применением CAD/CAM/CAE систем для решения проблем, возникающих при переходе производства от физических моделей и плазово-шаблонного метода увязки деталей вертолета к электронному макету изделия. На примере особо ответственной детали ЛА показаны возможности OMW технологий для реализации виртуального базирования и принципов адаптивной механической обработки. Исследована и экспериментально обоснована эффективность применения элементов искусственного интеллекта на базе нейронных сетей как средства прогноза качества механической обработки авиационных деталей.

Полученные в работе научные и прикладные результаты использовались при выполнении гранта Российского фонда фундаментальных исследований 15-08-00849А «Разработка численных и экспериментальных методов создания оптимальной структуры армированных стекло- и углепластиков авиационного применения».

Библиографический список

1. Астапов В.Ю., Хорошко Л.Л., Афшари П., Хорошко А.Л. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69638>
2. Ефимов Е.Н., Шевгунов Т.Я. Разработка и исследование методики построения нейронных сетей на основе адаптивных элементов // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29159>
3. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
4. Шевцов С.Н., Сибирский В.В., Чигринец Е.Г. Применение нейронных сетей в прогнозировании качества механической обработки особо нагруженных композитных конструкций // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75572>
5. Грищенко С.В. Расчет и проектирование изделий конструкции самолета из слоистых композитов с учетом межслоевых эффектов // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63011>
6. Abu-Mahfouz I. Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, no. 43, pp. 707 - 720.

7. Arraiza A.L. et al. Experimental analysis of drilling damage in carbon-fiber reinforced thermoplastic laminates manufactured by resin transfer molding // Journal of Composite Materials, 2011, no. 46(6), pp. 717 - 725.
8. Chen W.C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, no. 37(8), pp. 1097 - 1108.
9. Durao L.M. et al. Comparative analysis of drills for composite laminates // Journal of Composite Materials, 2011, no. 46 (14), pp. 1649 - 1659.
10. Gaitonde V.N. A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites // Journal of Composite Materials, 2011, no. 45 (22), pp. 2359 - 2368.
11. Ghasemi F.A. et al. Effects of Drilling Parameters on Delamination of Glass-Epoxy Composites // Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, no. 5(12), pp. 1433 - 1440.
12. Hocheng H., Dharan C.K.H. Delamination during drilling in composite laminates // Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry, 1999, no. 112, pp. 236 - 239.
13. Kilickap E. Investigation into the effect of drilling parameters on delamination in drilling GFRP // Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, no. 29(23), pp. 3498 - 3503.
14. Mishra R., Malik J., Singh I. Singh Prediction of drilling-induced damage in unidirectional glass-fibre-reinforced plastic laminates using an artificial neural network //

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B // Journal of Engineering Manufacture, 2010, no. 224(5), pp. 733 - 738.

15. Muruges, M.C., Sadashivappa K. Influence of filler material on Glass fiber epoxy composite laminates during drilling // International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2012, vol. 3, issue 1, pp. 233 - 239.

16. Singh I., Bhatnagar N. Drilling-induced damage in uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, no. 27, pp. 877 - 882.

17. Stone R., Krishnamurthy K. A Neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite–epoxy laminates // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, no. 36, pp. 985 - 1003.

18. Tagliaferri V., Caprino G., Diterlizzi A. Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1990, no. 30(1), pp. 77 - 84.

19. Wang B. et al. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks // Engineering Manufacture, 2014, vol. 228(7), pp. 698 - 706.

20. Zitoune R., Krishnaraj V., Collombet F. Study of drilling of composite material and aluminium stack // Composites Structure, 2010, vol. 92, pp. 1246 - 1255.

21. Zhang Z., Friedrich K. Artificial neural networks applied to polymer composites: a review // Journal of Composites Science and Technology, 2003, no. 63, pp. 2029 - 2044.

Статья поступила в редакцию 26.11.2018