

УДК 621.923

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

© Владимир Борисович Богуцкий

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия
bogutskivb@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы обеспечения точности и производительности обработки нежестких деталей высокой точности на технологических операциях механической обработки. Показано, что в настоящее время во многих отраслях машиностроения идет рост объема производства деталей такого типа, вызванный возрастанием объема выпуска точных машин, оптимизацией конструкций деталей и ростом требований к снижению материалоемкости машин. На основе выполненного анализа сформулированы направления совершенствования технологии обработки нежестких деталей высокой точности, реализация которых, при проектировании технологических операций механической обработки и необходимой технологической оснастки, позволит обеспечить требуемую точность обработки и увеличение производительности технологического процесса при выпуске продукции заданного качества.
Ключевые слова: нежесткие детали, технологическая система, высокопроизводительная обработка, рекомендации.

THE MAIN DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF PROCESSING OF NON-RIGID PARTS OF HIGH PRECISION

© V.B. Bogutsky

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
bogutskivb@yandex.ru

Abstract. In the article discusses the issues of ensuring the accuracy and productivity of processing non-rigid parts of high accuracy in technological operations of machining. It is shown that currently in many branches of engineering there is an increase in the volume of production of parts of this type, caused by an increase in the output of precision machines, optimization of component designs and an increase in requirements to reduce the material consumption of machines. Based on the analysis, the directions for improving the processing technology of non-rigid parts of high precision are formulated, the implementation of which, when designing technological operations of machining and the necessary technological equipment, will ensure the required processing accuracy and increase the productivity of the technological process when manufacturing products of a given quality.

Keywords: non-rigid parts, technological system, high-performance processing, recommendations.

Введение. В настоящее время многие отрасли машиностроения, такие как оборонная, автотранспортная, космическая, авиационная, станкостроение и др. используют в узлах ответственного назначения нежесткие детали. Увеличение применения таких деталей и соответственно, объёма их производства вызвано оптимизацией формы деталей и конструкции, постоянным ростом требований к снижению материалоемкости машин и их массы, а так же увеличением объёма выпуска точных машин.

Отличительной чертой конструкций нежестких деталей является то, что практически все их поверхности являются рабочими и к ним предъявляются высокие требования к взаимному расположению поверхностей, их шероховатости и волнистости. Особенности конструкций нежестких деталей (различные геометрические формы сечений, тонкостенность конструкций, значительный разброс форм и размеров поперечных сечений, большое количество сопрягаемых элементов, малые значения моментов инерции) и особенности технологии их обработки (методы обработки, схема закрепления, технологические режимы, наличие упругой остаточной деформации на всех этапах обработки, возникающие остаточные напряжения и др.) необходимо принимать во внимание при проектировании технологии их обработки с учетом производственных требований к обеспечению высокой производительности процесса [1-5].

1. Изложение основного материала. С технологической точки зрения нежесткие детали высокой точности выделяются среди компонентов технологической системы тем, что они наиболее податливы и чувствительны к упругим, температурным деформациям и вибрациям [6-10 и др.].

Вторая особенность – количественная соизмеримость заданных допусков на размеры детали и ее элементы с упругой и температурной деформацией материала, возникающей при обработке [11-14].

С учетом заданного допуска наибольшее продольное нагружение материала детали согласно закону Гука описывается неравенствами

$$\sigma \leq \sigma_{\text{пц}}, \quad \varepsilon_{\text{д}} \leq \varepsilon, \quad \delta \leq \Delta l,$$

где σ – напряжение в детали, МПа; $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности материала, МПа; ε , $\varepsilon_{\text{д}}$ – относительные продольные деформации материала ($\varepsilon = \Delta l / l$, $\varepsilon_{\text{д}} = \delta / l$); δ – заданный допуск, мм; l – длина детали, мм; Δl – абсолютное удлинение материала, МПа.

На диаграмме растяжения (рис. 1) характер допустимого нагружения материала отчетливо виден в упругой зоне, где σ и $\varepsilon_{\text{д}}$ вписываются в прямоугольник АОВС со стороны $\sigma_{\text{пц}}$ и ε [15, 16 и др.].

С учетом вышеизложенного условия получения заданной точности, например по высоте кольцевой детали при ее продольном нагружении силами крепления и резания (при шлифовании, точении или фрезеровании), описывается выражениями

$$\begin{cases} \delta \geq \Delta l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_2 + (\pm \Delta l_3) + (\pm \Delta l_4) \\ \delta > y \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta l_0 = \frac{l \cdot (N + R)}{ES}$; ES – упругая линейная деформация детали, м; N , R – осевые силы крепления и резания, Н; $\Delta l_1 = w_1(N + R) \times 10^3$ $\Delta l_2 = w_2(N + R) \times 10^3$ упругие перемещения стыков

детали с технологической оснасткой и узлом, м; w_1, w_2 – податливость стыков, м/Н; $\Delta l_3 = \alpha_l \Delta T$ – температурные удлинения, м; α_l – коэффициент линейного расширения, 1/К; ΔT – средняя избыточная температура, К; $\Delta l_4 = lP/ES$ – изменение длины, вызванное неуравновешенностью по всему объему детали внутренних сил в материале заготовки при упругопластическом нагружении; P – равнодействующая внутренних сил, приведенная к продольной нагрузке, Н; y – отклонение от плоскости опорной поверхности детали, м.

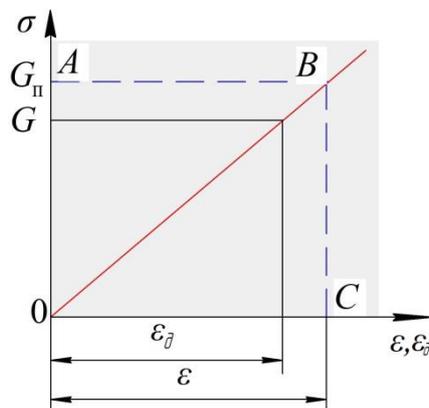


Рис. 1. Диаграмма растяжения материала.

Подставив значения слагаемых в формулу (1), получим

$$\delta \geq (N + R) \cdot \left[\frac{l}{ES} + (w_1 + w_2) \cdot 10^{-3} \right] + l \cdot \left[(\pm \alpha T) + \left(\pm \frac{P}{ES} \right) \right]. \quad (2)$$

Из неравенства (2) видно, что наибольшая производительность труда, достигается при $R \rightarrow R_{\max}$; N, w_1, w_2, T и $P \rightarrow 0$. Отсюда неравенство (1) принимает вид

$$\delta \geq \frac{R_{\max} \cdot l}{ES}. \quad (3)$$

Технологическое армирование тонкостенных сечений деталей позволяет повысить опорные поверхности и режимы обработки при этом формулу (3) можно записать так:

$$\delta \geq \frac{R_{\max} \cdot l}{E \cdot (S + S_0)},$$

где S_0 – площадь опоры, полученная в результате армирования детали.

В отличие от элементарной схемы продольного нагружения детали схема поперечного нагружения деталей типа нежестких валов описывается более сложным выражением. Здесь под действием сил резания и осевой силы крепления деталь, закрепленная в центрах, упруго прогибается. Если принять абсолютно жесткими узлы технологической системы, условие получения заданной точности диаметральных элементов нежесткого вала при точении или круглом шлифовании выразится неравенством [17, 18 и др.]

$$0,5\delta \geq \frac{P_y \cdot \gamma \cdot (l-x)^2 \cdot x^2}{3E \cdot I \cdot l},$$

где P_y – поперечная сила, изгибающая вал при обработке; γ – коэффициент, учитывающий связь между силой резания и эквивалентной силой, действующей на деталь в осевом направлении; x – текущее расстояние от переднего торца детали до точки приложения поперечной силы.

Из приведенного неравенства видно, что для интенсификации процесса обработки нежестких деталей следует стремиться к уменьшению величины x за счет применения дополнительных опор (подшипников скольжения, вмонтированных в люнетах).

Таким образом, при обработке нежестких деталей высокой точности критерием силового нагружения служат погрешности формы и размеров, вызванные жесткостью конструкции, схемой установки и зажима заготовки. Это главное отличие в силовом нагружении нежестких деталей от массивных, где основным критерием является шероховатость и бездефектность обрабатываемой поверхности, мощность станка и износостойкость инструмента.

Приведенные соображения, а также результаты анализа других схем нагружения и конструкций обрабатываемых заготовок позволяют дать ряд рекомендаций, способствующих высокопроизводительной обработке нежестких деталей высокой точности.

1. Применять малонагруженные технологические процессы с равномерно распределенными усилиями резания и закрепления. Этим условиям вполне отвечают химические, электрохимические и физические способы обработки, протекающие при ослабленной ионной связи материала, а также процессы бесцентрового шлифования, тонкого точения и фрезерования.

2. Снижать упругие деформации исходных заготовок обрабатываемых деталей высокоскоростным деформированием и учетом направления волокон материала в процессе формирования заготовки детали; устранением коробления формы исходной заготовки перед ее раскроем; проектированием заготовок симметричной формы с замкнутым контуром для изготовления деталей с незамкнутым контуром; обработкой серии близких по размерам нежестких деталей из групповой заготовки; применением симметричного нагрева при старении и термообработкой заготовок после заготовительных операций; термообработкой (нормализация) деталей перед финишной обработкой; одновременным снятием равномерных припусков с противоположных поверхностей.

3. Выбирать способы установки с учетом несоосности базовой и обрабатываемой поверхностей круглых деталей по формулам [19-21]:

– при установке заготовки в трехкулачковых патронах и на плунжерных оправках

$$e = a_1 \cdot \sqrt{\delta_D} (1 + 0,02l_n);$$

где e – эксцентриситет между базовой и обрабатываемой поверхностями; a_1 – коэффициент, зависящий от категории установки и приспособления по точности; при нормальной точности $a_1=0,17$, повышенной $a_1=0,11$ и высокой $a_1=0,08$; δ_D – допуск на диаметр базирующей поверхности; l_n – расстояние от торца патрона или оправки до наиболее удаленной точки приложения силы резания;

– при установке заготовки в цанговых патронах и на цанговых оправках

$$e = a_2 \cdot \sqrt{\delta_D} (1 + 0,01l_n)$$

где $a_2 = 0,12$ при нормальной, $a_2 = 0,09$ при повышенной, $a_2 = 0,06$ при высокой точности установки детали и изготовления приспособления;

– при установке заготовки в мембранных патронах и на оправке с гидропластом

$$e = 0,04\sqrt{\delta_D}(1 + 0,02l_n)$$

4. Предусматривать при выполнении данной операции полное удаление погрешностей поверхностных слоев и формы заготовок, оставшихся после предшествующей операции; для этого операционным припуск на поверхности тел вращения может рассчитываться по зависимости [22]

$$Pi_{i_{\min}} = 2\left((R_z + T)_{i-1} + \sqrt{\delta_u^2 + \delta_i^2}\right) \quad (4)$$

где R_z – высота микронеровностей; T – глубина дефектного слоя; δ_n – смещение оси заготовки в расчетном сечении за счет изогнутости; δ_i – несоосность поверхности, обусловленная влиянием погрешностей установки, базирования и закрепления, возникающих на предшествующей и выполняемой операциях.

Следует заметить, что для уменьшения изогнутости заготовок и исключения упругой наследственности производят горячую правку ($\delta_n \rightarrow 0$). Тогда формула (4) принимает вид

$$Pi_{i_{\min}} = 2\left((R_z + T)_{i-1} + \sum \delta_n\right)$$

5. Назначать опорной базой элементы детали, имеющие наибольшие моменты инерции сечений и поверхности с наилучшей плоскостью и шероховатостью; преимущественно нагружать эти элементы нормально распределенными силами закрепления и резания.

6. Армировать неустойчивые и вибрирующие элементы детали технологическими наполнителями (сплав Вуда, карбамид, ксилит, полиэтиленгликоль, фотополимерные составы, твердые намагничивающие тела различной геометрической формы, резиновые пробки, кольца, разжимные пружинные вкладыши, виброгасители и т.д.) [6, 11-13, 23, 24 и др.].

7. Оснащать технологические процессы магнитной, электромагнитной, электростатической или вакуумной технологической оснасткой, обладающей быстродействующими приводами и равномерно распределенной нагрузкой закрепления [25-30 и др.].

8. Строго регламентировать податливость стыков обрабатываемых деталей с технологической оснасткой и узлов металлорежущего оборудования; одновременно уменьшать их податливость высокоточным шлифованием и шабрением контактируемых поверхностей и предварительной затяжкой стыков.

9. Выполнять чистовые и окончательные операции со строго регламентированными режимами резания на станках с повышенной и особо высокой точностью без перебазирования и перезакрепления детали,

10. Интенсифицировать рассеяние тепловых потоков из зоны резания увеличением площади и толщины опорных элементов оснастки и изготовлением их из высокотеплопроводных материалов, т.е. должны выполняться условия:

$$S_o > S_d, \quad T_{по} \gg T_{пд}, \quad h_o > h_d$$

где S_o, S_d – опорные поверхности оснастки и детали; $T_{по}, T_{пд}$ – теплопроводности их материалов; h_o, h_d – толщины опорных элементов оснастки и детали.

Заключение. Выполненный анализ позволил сформулировать ряд рекомендаций, направленных на совершенствование технологии обработки нежестких деталей высокой точности. Реализация предложенных в работе направлений при проектировании технологических операций механической обработки позволит обеспечить:

- требуемую точность обработки за счет снижения упругих деформаций исходных заготовок обрабатываемых деталей и их деформации от совместного воздействия сил резания и сил закрепления, а так же за счет снижения усилий и их уравнивания;
- разработку технического задания на проектирование технологической оснастки, учитывающего особенности технологии обработки и конструкции нежестких деталей и изменение их свойств при реализации принятой технологии;
- увеличение производительности технологического процесса при выпуске продукции заданного качества.

Список литературы

1. *Zhilyaev A.S., Kugultinov S.D., Efremov S.M.* Problems of ensuring accuracy in the manufacture of large-sized thin-walled parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 537. DOI:10.1088/1757-899X/537/3/032069.
2. *Seliger G., Szimmat F., Niemeier J., Stephan J.* Automated handling of non-rigid parts // CIRP Annals. – 2003. – Vol. 52, Iss. 1. – P. 21-24.
3. *Okunев V.S.* Improving accuracy of non-rigid component parts surfaces positional relationship while manufacturing // Aerospace MAI Journal. – 2016. – Vol. 23, No. 2. – P. 138-148.
4. *Maximov Y.* Theory and practice of technology for machining non-rigid smooth shafts // Key Engineering Materials. – 2011. – Vol. 496. – P. 168-175.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.496.168>.
5. *Warnecke H.J., Schraft R.D., Fischer G.E.* Assembly of non-rigid parts, problems and solutions // CIRP Annals. – 1987. – Vol. 36, Iss. 1. – P. 5-7.
6. *Подпоркин В.Г.* Обработка нежестких деталей. – М.: Машгиз, 1959. – 208 с.
7. *Walsh R.A.* McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook (3rd Edition). – McGraw-Hill Publ., 2006. – 1006 p.
8. *Дальский А.М.* Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
9. *Hoffman P.J., Hopewell E.S., Janes B.* Precision machining technology (3rd Ed.). – Cengage Learning Publ., 2015. – 800 p.
10. *Бармин Б.П.* Вибрации и режимы резания. – М.: Машиностроение, 1972. – 71 с.
11. *Liang S.Y., Shih A.J.* Analysis of machining and machine tools. – Springer, 2016. – 233 p.
12. *Hassan El-Hofy.* Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes (3rd Ed.) – CRC Press Publ., 2018. – 556 p.
13. *Куклев Л.С., Тазетдинов М.М.* Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности. – М.: Машиностроение, 1978. – 104 с.
14. *Grzesik W.* Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. – Elsevier Science Publ., 2016. – 472 p.
15. *Тимошук Л.Т.* Механические испытания металлов. – М.: Металлургия, 1971. – 224 с.
16. *ASM Handbook. Vol.8: Mechanical Testing and Evaluation.* Ed. by H. Kuhn and D. Medlin. – ASM International Publ., 2000. – 998 p.

17. Modern machining technology. A practical guide. Ed. by J. Paulo Davim. – Woodhead Publ., 2011. – 412 p.
18. *Васильевых Л.С., Васильевых С.Л., Саитов В.Е.* Исследование средств оснастки для снижения деформаций нежестких валов: моногр. – LAP LAMBERT Academic Publ., 2013. – 152 с.
19. *Ломова О.С., Ломов С.М., Моргунов А.П.* Точность обработки деталей на круглошлифовальных станках: моногр. – М.: Издательский центр «Технология машиностроения», 2011. – 176 с.
20. *Маталин А.А.* Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. – М.-Л.: Машиностроение, 1985. – 320 с.
21. *Childs T., Maekawa K., Obikawa T., Yamane Y.* Metal Machining: Theory and Applications. – Arnold Publ., 2000. – 412 p.
22. *Иващенко И.А.* Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.
23. *Внуков Ю.Н., Гермашев А.И., Мозговой В.Ф., Балушок К.Б., Кондратюк Э.В.* Применение технологических сред при фрезеровании тонкостенных деталей: моногр. – Запорожье: ЗНТУ, 2016. – 187 с.
24. *Болсуновский С., Вермель В., Губанов Г.* Применение специальных гасителей вибраций при чистовом фрезеровании тонкостенных деталей// САПР и Графика. – 2014. – № 8. – С. 110-112.
25. *Верников А.А.* Магнитные и электромагнитные приспособления в металлообработке. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
26. *Rao P.N.* Manufacturing technology: metal cutting and machine tools. – McGraw-Hill Education Publ., 2000. – 440 p.
27. *Зубарев Ю.М.* Расчет и проектирование приспособлений в машиностроении. – СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – 320 с.
28. *Богущий В.Б., Шрон Л.Б.* Направления развития процесса абразивной обработки для обеспечения качества поверхностного слоя деталей // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2019. – № 7. – С. 117-119.
29. *Rodríguez M., Collado V., Böse H., Gerlach T., Würz T., Holz B., et al.* Compact fixturing based on magneto-rheological fluids for aeronautic stringers milling // SAE International journal of aerospace. – 2010. – No.1. – P. 59-66.
30. *Mikell P.G.* Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. – Wiley Publ., 2012. – 1128 p.

Дата поступления: 12 февраля 2020 г.