

УДК 621.96
DOI: 10.12727/17804

Н.М. Султан-заде, д.т.н.,
В.С. Окунев, аспирант
(Московский государственный машиностроительный университет (ММИ))
E-mail: mainrefer@yandex.ru

Расчет деформации нежестких заготовок в зависимости от схемы закрепления и режимов резания

Представлен метод определения деформаций заготовок от сил закрепления на основе метода конечных элементов. Произведено формулирование граничных условий при проведении расчетов для тонкостенной заготовки от сил закрепления при использовании метода конечных элементов. Найдены и представлены значения деформаций для нежестких заготовок в зависимости от схемы закрепления, геометрии заготовки и режимов резания.

Ключевые слова: метод конечных элементов; погрешность закрепления; ANSYS; граничные условия.

N.M. Sultan-zade, d.en.s.,
V.S. Okunev, postgraduate
(Moscow State Industrial University (MAMI))

Analysis of deformation of non-stiff billets depending on the clamping scheme and cutting modes

Clamping of non-stiff thin-walled billets on machine tools for various machining operations is accompanied by the appearance of significant deformations in them. The new approach to the analysis of the billet deformations from the clamping forces is developed on the base of finite element method. The calculation error of billet fixing is estimated on the example of a cylindrical billet. For various fixing schemes the corresponding boundary conditions are developed. The error analysis results obtained by finite element method for various fixing schemes, billet geometry and cutting modes are presented.

Keywords: finite element method; fixing errors; ANSYS; boundary conditions.

Закрепление тонкостенных нежестких заготовок на металлорежущих станках при различных операциях механической обработки сопровождается возникновением значительных деформаций. Для тонкостенных заготовок эти деформации оказывают большое влияние на точность обработки. При проектировании технологического процесса изготовления таких деталей необходимо учитывать величину деформации заготовки в зависимости от принятой схемы закрепления.

Новый подход к расчету деформаций от сил закрепления может быть получен при создании методики на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Расчет максимальной деформации заготовки для различных схем закрепления в

зависимости от режимов резания. Расчет максимальной деформации заготовок при их закреплении методом конечных элементов является итерационным процессом. Это связано с тем, что точность расчета существенно зависит от выбранной геометрии конечного элемента и его размеров.

Кроме того точность расчета максимальной деформации заготовок при их закреплении МКЭ сильно зависит от выбранных для расчета граничных условий, зависящих от схемы закрепления и конструкции используемого приспособления.

В настоящее время методика выбора этих параметров отсутствует.

Приведем блок-схему алгоритма расчета (рис. 1).

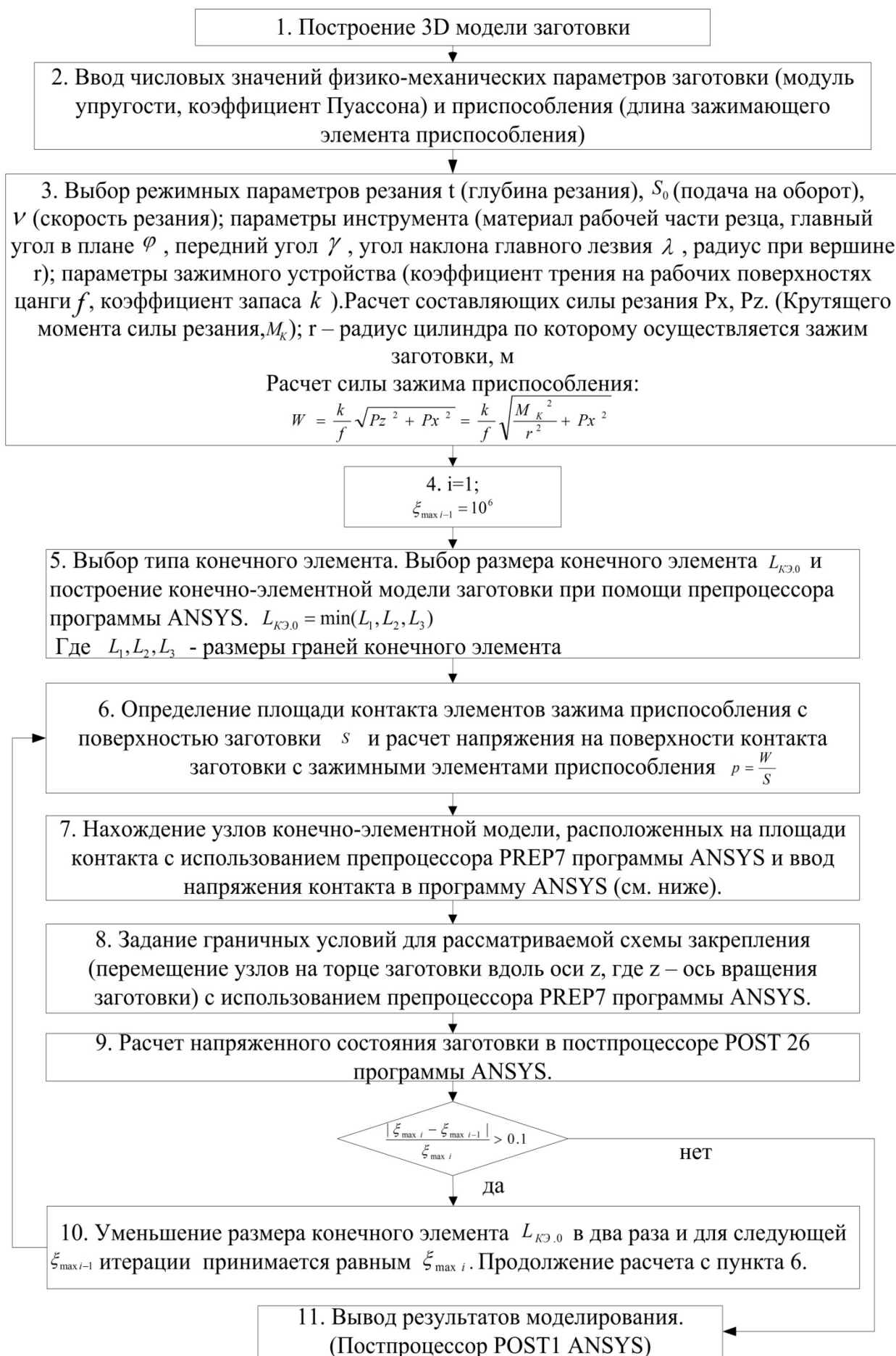


Рис. 1. Алгоритм расчета максимальной деформации заготовки при закреплении ее в приспособлении

Для автоматизации представленного алгоритма и расчетов МКЭ использован программный комплекс ANSYS [1].

Определение площади контакта S в пункте 6 (см. рис.1) существенно зависит от приспособления (цанговая оправка, трехкулачковый патрон и др.).

Определение площади контакта лепестков цанги с заготовкой осуществляется следующим образом. Рассмотрим диаметрально расположенные лепестки цанги при закреплении заготовки (рис. 2, а). Угол α – угол дуги контакта лепестка цанги АВ.

$$\text{Тогда длина дуги АВ: } L_{AB} = \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180^\circ}.$$

Площадь контактирующего сегмента: $S = L_{AB} L_{цз} z$, где z – количество лепестков цанги.

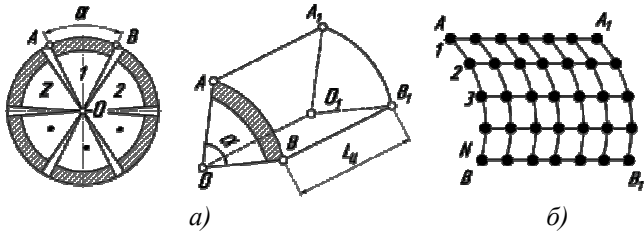


Рис. 2. Определение исходных данных для расчета в цанговой оправке методом конечных элементов: а – параметры лепестка цанги; б – узлы площадки контакта

Условное расположение узлов конечно-элементной модели, расположенных на площади контакта представлено на рис. 2, б.

Определение площади контакта зажимных элементов других приспособлений (токарного патрона и др.) с заготовкой производится аналогично в зависимости от принятой схемы закрепления заготовки (рис. 3).

Задания граничных условий в пункте 8 (см. рис. 1) зависят от схемы закрепления и конструкции используемого приспособления, и они рассматриваются отдельно.

Численное исследование погрешности закрепления в цанговом патроне проводилось на примере цилиндрической заготовки изготовленной из стали 40Х, имеющей следующие физико-механические характеристики: предел текучести $\sigma_B = 700$ МПа; модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Цанговая оправка из стали 45; 28...34 HRC; длина лепестков цанги

$L_{ц} = 26$ мм; наружный диаметр лепестка цанги $D_{ц} = 27,4$ мм; количество лепестков цанги $B = 4$; угол конуса цанги $\alpha_{ц} = 20^\circ$.

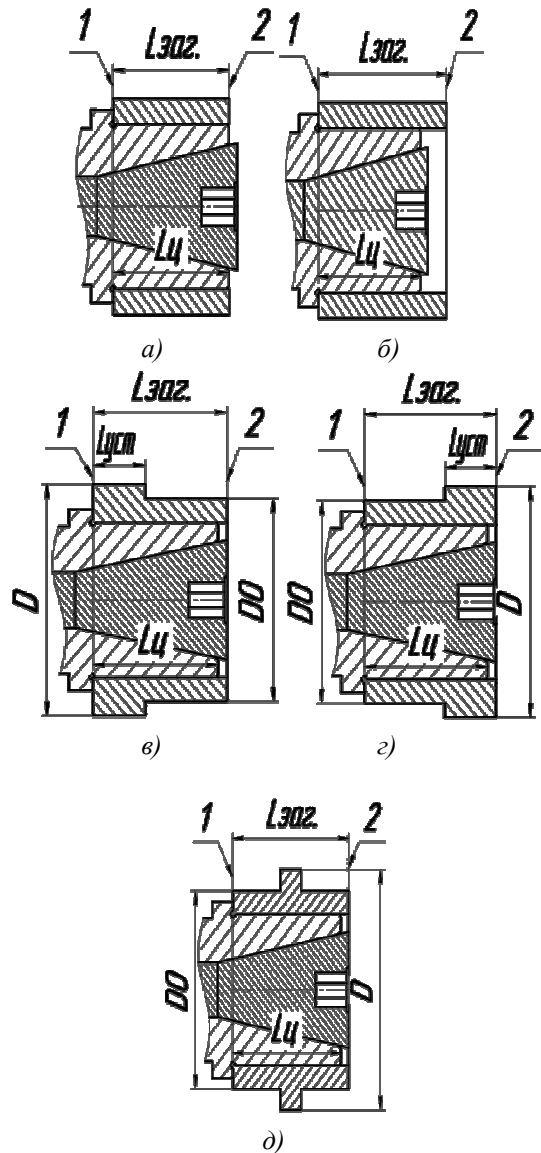


Рис. 3. Расчетная схема: а – д – схемы закрепления заготовки

Расчет погрешности закрепления заготовок для конечно-элементной математической модели осуществляется при соблюдении условия исключения проворота заготовки от действия силы резания [2, 3, 4]. Требуемая суммарная сила закрепления определяется по формуле (см. рис. 1, п.3).

Для проведения расчета погрешностей закрепления заготовок в цанговом патроне МКЭ в зависимости от схемы закрепления и геометрии заготовки разработаны соответствующие им граничные условия (рис. 4).

Число граничных условий должно быть минимально необходимым. В случае расчета

максимальной деформации заготовок при их граничном условии, исходя из схемы закрепления, является отсутствие перемещения торца *I* (см. рис. 3) вдоль оси вращения заготовки (упор в торец цангового патрона).

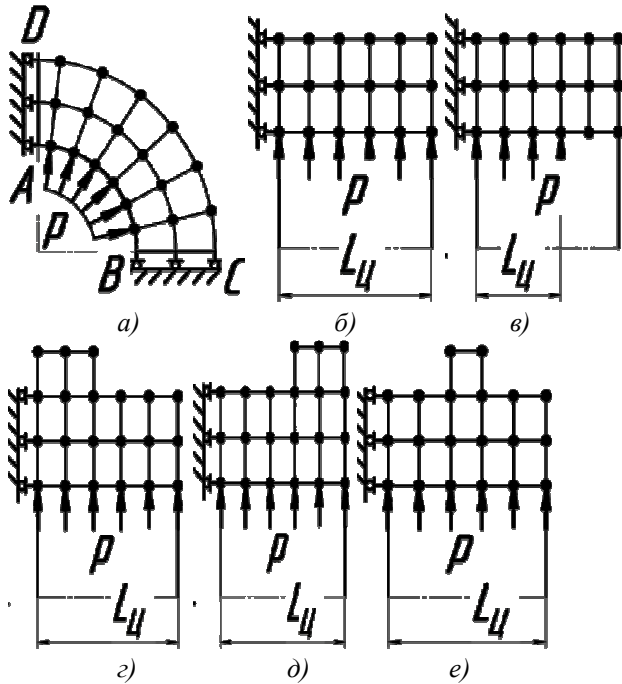


Рис. 4. Расчетная схема:
а – д – граничные условия

Наложение дополнительных ограничений на перемещения узлов конечно-элементной модели изменяет напряженно деформированное состояние заготовки от сил закрепления, и сильно влияет на полученный результат (значение расчета значительно расходится с экспериментом).

Приложение граничных условий к узлам конечно-элементной модели зависит от мето-

закреплении единственным кинематическим да построения сетки (произвольная или упорядоченная). Для заготовки сложной геометрии задача построения упорядоченной или структурированной сетки является трудоемкой, кроме того, возможно появление вырожденных ячеек, приводящих к существенному снижению точности.

При проведении расчета было выявлено что, из-за неизбежных ошибок округления результатов, ограничения перемещений узлов конечно-элементной модели заготовки вдоль оси вращения недостаточно.

В качестве кинематических граничных условий (ГУ) принято отсутствие перемещений узлов КЭ модели на торце *I* (упор в этот торец при зажиме цанги) в осевом направлении, отсутствие перемещений вдоль отрезка *BC* в вертикальном направлении, отсутствие перемещений вдоль отрезка *AD* в горизонтальном направлении (см. рис. 4). Данные ГУ задавались при помощи инструментов программного комплекса ANSYS.

Далее рассмотрим результаты моделирования в зависимости от различных геометрических параметров и различных схем закрепления по предлагаемой методике расчета.

Граничные условия и результаты расчетов по схеме закрепления $L_{заг} \leq L_{ц}$ (см. рис. 3, а). Граничные условия для расчета приведены на рис. 4, а, б. В табл. 1 приведены результаты расчетов напряжений и деформаций от силы закрепления лепестками цанги, а также качества точности, соответствующие полученным значениям.

Области полученных, в результате расчета максимальных деформаций, стенок заготовки в радиальном направлении представлены на рис. 5, в, г.

1. Деформации заготовки от сил зажима цангового патрона в зависимости от глубины резания

№ п/п	Подача S_0 , мм/об	Глубина резания t , мм	Сила зажима W , Н	Максимальная деформация (радиальное направление) δ_{max} , мкм	Максимальные напряжения от сил зажима, МПа	Квалитет точности (IT)
1	0,5	2,7	18 000	220	921	14 (620 мкм)
2		2	12 293,5	183	463	13 (390 мкм)
3		1,5	9 220,2	137	350	12 (250 мкм)
4		1	6 146,8	91	235	11 (160 мкм)
5		0,4	2 458,7	36,6	98	9 (62 мкм)
6		0,2	1 229,4	18,3	52	8 (39 мкм)
7		0,1	614,7	9,18	20	7 (25 мкм)

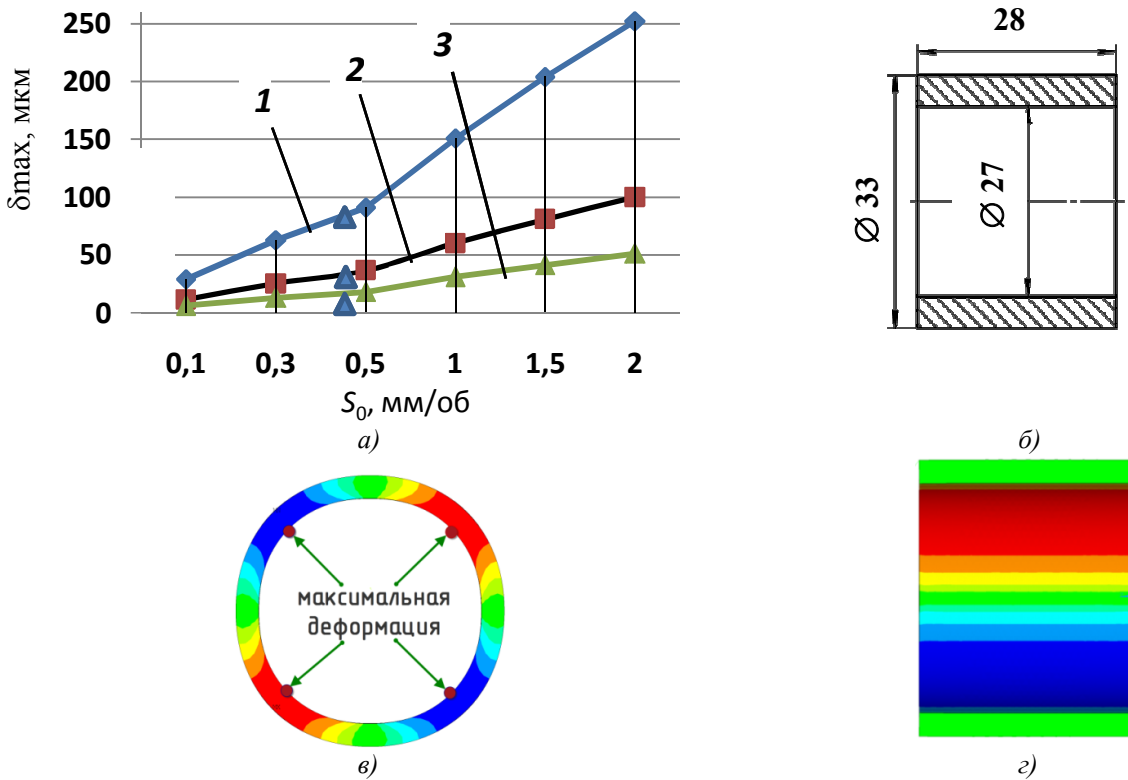


Рис. 5. Максимальная деформация заготовки от сил зажима в радиальном направлении:

a – зависимость деформации от сил зажима от подачи на оборот при $t = 1$ мм (1), $t = 0,5$ мм (2), $t = 0,2$ мм (3);
б – размеры заготовки для расчета; *в* – распределение максимальных деформаций в радиальном направлении;
г – сечение, проходящее через середину прорези между лепестками цанги

Результаты расчета показывают (см. табл. 1), что для рассматриваемой схемы закрепления при глубине резания свыше 2,7 мм появляется пластическая деформация заготовки от сил закрепления. Из данных расчета видно, что уменьшение глубины резания ведет к уменьшению погрешности закрепления.

В табл.1 приведены максимальные деформации в радиальном направлении с соответствующим значением качества точности для рассматриваемого размерного интервала, что показывает возможную достижимую точность обработки.

На рис. 5, *a* приведен график максимальной деформации в радиальном направлении в зависимости от подачи на оборот для глубин резания $t = 1; 0,5; 0,2$ мм. Из графика видно, что уменьшение подачи ведет к уменьшению требуемой силы закрепления и соответствующему уменьшению максимальной деформации.

Анализ, получаемых в результате расчетов, данных дает возможность оценивать значение погрешности закрепления при выбранных режимах резания: так, сопоставимые по величине деформации заготовки от сил закрепления будут при $t = 1$ мм, $S_0 = 0,5$ мм/об (см.

рис. 5, *a*, кривая 1) и при $t = 0,5$ мм, $S_0 = 2$ мм/об (см. рис. 5, *a*, кривая 2) при $\delta_{max} = 100$ мкм.

Таким образом, результаты расчетов показывают, что обработка при $t = 1$ мм, $S_0 = 0,5$ мм/об по производительности в два раза эффективнее, чем при $S_0 = 2$ мм/об и $t = 1$ мм.

Обработка при $S_0 \geq 2,0$ мм/об и $t \geq 1$ мм недопустима, так как приводит к упругой деформации заготовки от сил закрепления, превышающей поле допуска по 14 качеству точности (см. рис. 5, *a*, кривая 1).

Граничные условия и результаты расчетов по схеме закрепления $L_{заг} > L_{Ц}$ (см. рис. 3, б). Рассмотрим схему закрепления с выступом 2 мм одного из торцов 2 заготовки (см. рис. 3, б). Граничные условия см. рис. 4, *a, б*.

На графике рис. 7 (см. обложку) приведены результаты расчетов напряжений и деформаций от силы закрепления лепестками цанги, а также качества точности, соответствующие полученным значениям, при данной схеме закрепления.

Максимальная деформация заготовки от сил закрепления в радиальном направлении



Рис. 8. Распределение деформации по длине заготовки от сил зажима в радиальном направлении:

1 – без уступа и вылета; 2 – с вылетом заготовки; 3 – с уступом с упором в больший диаметр; 4 – с уступом с упором в меньший диаметр; 5 – с уступом в средней части заготовки

представлена на рис. 6 а, б (см. обложку). Анализ результатов расчетов (см. рис. 7, на обложке) показывает, что для данной схемы закрепления максимальные деформации при приведенных глубинах резания незначительно увеличились.

Анализ распределения деформаций по длине образующей заготовки (рис. 8) показывает, что от торца 1 к торцу 2 значения существенно отличаются, разница максимальной деформации на длине 17...28 мм достигает 25 мкм (50 мкм на диаметр).

Граничные условия и результаты расчетов по схеме закрепления заготовки с уступом $L_{заг} \leq L_{ц}$ (см. рис. 3, в). Рассмотрим схему закрепления заготовки с уступом в области торца 1, с упором в этот торец при закреплении ($L_{уст} = 10$ мм, $D = 38$ мм).

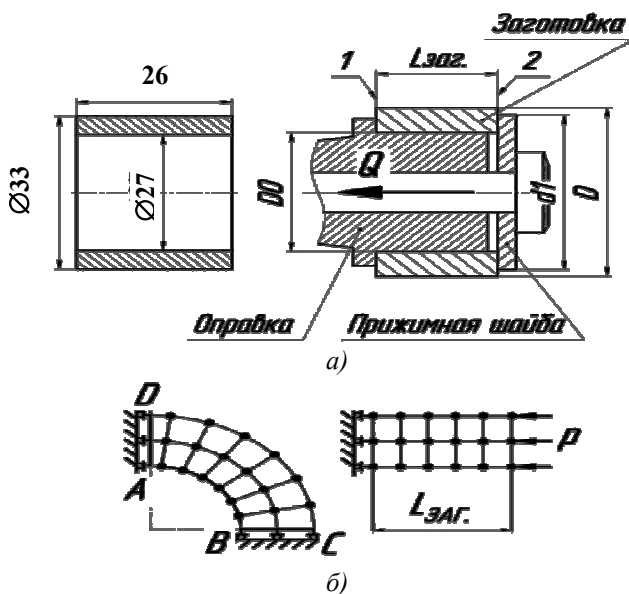


Рис. 9. Расчетная схема: а – схема закрепления заготовки; б – граничные условия

Граничные условия см. рис. 4, а, з. На рис. 7 приведены результаты расчетов напряжений и деформаций от силы зажима лепестками цанги, а также качества точности соответствующие полученным значениям, при данной схеме закрепления.

Максимальная деформация заготовки от сил зажима в радиальном направлении см. рис. 6 в, з. Анализ результатов расчетов (см. рис. 7) по этой схеме закрепления показывает, что максимальная деформация в радиальном направлении при данной схеме закрепления меньше, чем при закреплении втулок без уступа, что уменьшает погрешность закрепления заготовок с такой геометрией.

Анализ распределения деформаций по длине образующей заготовки, от торца 1 к торцу 2 значительно отличаются. Область максимальных деформаций в радиальном направлении смещены к торцу 2, что может привести к соответствующей погрешности формы заготовки (см. рис. 8).

Граничные условия и результаты расчетов по схеме закрепления заготовки с уступом $L_{заг} \leq L_{ц}$ (см. рис. 3, з). Рассмотрим схему закрепления заготовки с уступом в области торца 2, с упором в торец 1 при закреплении ($L_{уст} = 10$ мм, $D = 38$ мм). Граничные условия см. рис. 4, а, д.

На рис. 7 приведены результаты расчетов напряжений и деформаций от силы зажима лепестками цанги, а также качества точности соответствующие полученным значениям, при данной схеме закрепления. Максимальная деформация заготовки от сил зажима в радиальном направлении см. рис. 6, д, е.

Максимальная деформация при данной схеме закрепления незначительно меньше чем при закреплении с упором в торец 2 большего

диаметра, что говорит о незначительном снижении погрешности закрепления заготовки по такой схеме.

Анализ распределения деформаций по длине образующей заготовки от торца 1 к торцу 2 значительно отличаются (см. рис. 8). Область максимальных деформаций смещена в направлении торца 1, что может привести к соответствующей погрешности формы заготовки.

Граничные условия и результаты расчетов по схеме закрепления заготовки с уступом $L_{заг} \leq L_{ц}$ (см. рис. 3, д). Рассмотрим схему закрепления заготовки с уступом в середине ($L_{уст} = 10$ мм, $D = 38$ мм). Граничные условия см. рис. 4, а, е. На рис. 7 приведены результаты расчетов напряжений и деформаций от силы зажима лепестками цанги, а также качества соответствующие полученным значениям, при данной схеме закрепления. Максимальная деформация заготовки от сил зажима в радиальном направлении (см. рис. 6, ж, з).

Из представленных данных (см. рис. 7) видно, что максимальная деформация незначительно увеличилась по сравнению со схемами закрепления заготовки с уступом, смещенным к торцу, что говорит о незначительном увеличении погрешности заготовки.

Анализ распределения деформаций по длине образующей заготовки от торца 1 к торцу 2 значительно отличаются (см. рис. 8). Область максимальных деформаций смещена в направлении торца 1, что может привести к соответствующей погрешности формы заготовки.

Анализ полученных результатов показывает, что максимальная деформация в радиальном направлении в расчетных схемах (см. рис. 3) меняется незначительно, а распределение максимальной деформации по длине образующей заготовки отличается существенно.

Как видно из рис. 8, максимальное значение деформации по длине образующей заготовки от торца 1 к уступу в середине заготовки уменьшается, достигая минимального значения в середине заготовки, и далее вновь увеличивается к торцу 2.

Области максимальных деформаций смещены к торцам, что может привести к погрешностям формы заготовки.

Распределение деформации заготовки в радиальном направлении по образующей в области закрепления кулачком цанги в зависимости от длины заготовки для всех схем закрепления при глубине резания $t = 0,4$ мм

представлены на рис. 8.

Схема закрепления заготовки и геометрическая форма закрепляемой детали значительно влияют на получаемые деформации от сил закрепления. Во всех рассмотренных схемах закрепления при $t = 0,4$ мм максимальные деформации в пределах 35...40 мкм.

Из рис. 8 видно, что в зависимости от схемы закрепления и геометрии детали, распределение деформаций по длине заготовки существенно отличается. Так, при закреплении заготовки с вылетом и без вылета разница деформаций в области торца 2 достигает 25 мкм. Для заготовки с уступом в центре разница деформаций на уступе и по торцам достигает 10 мкм. Таким образом, в зависимости от распределения деформации можно ожидать получения конусности, бочкообразности и других погрешностей формы при обработке.

Для обеспечения более жестких допусков при обработке нежестких заготовок применяются оправки с гидропластом, с прижимом торца заготовки шайбой и другие. Рассмотрим типовую схему закрепления и граничные условия на оправках такого типа.

Граничные условия и результаты расчетов по схеме закрепления заготовки на оправке с прижимом шайбой (рис. 9). В схеме закрепления заготовки (рис. 9, а) принимаем: $L_{заг}$ – длина заготовки; D – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки; D_0 – диаметр упорного бурта оправки; d – диаметр оправки.

При данной схеме закрепления шейка оправки находится в сопряжении с поверхностью детали с минимальным зазором. Крепление детали на оправке происходит за счет сил трения по торцам – между торцами заготовки и торцами оправки и гайки.

Кинематические граничные условия для проведения расчета и расчетная схема для расчета деформации приведены на рис. 9, б.

Из представленных данных (рис. 10) видно, что максимальная деформация смещена к торцу 1 и уменьшается к торцу 2.

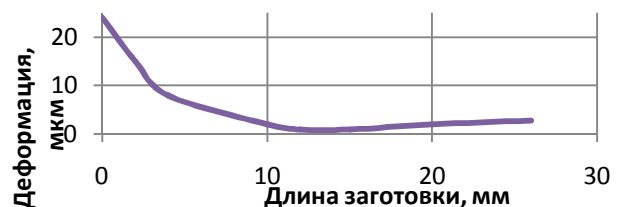


Рис. 10. Максимальная деформация заготовки от сил зажима в радиальном направлении

Менее точным, но более универсальным является закрепление заготовок в трехкулач-

ковом патроне.

Определение максимальной деформации закрепления в трехкулачковом патроне.

Численное исследование погрешности закрепления проведено в реечном трехкулачковом самоцентрирующем патроне на примере цилиндрической заготовки, изготовленной из латуни, имеющей следующие физико-механические характеристики: предел текучести $\sigma_B = 300$ МПа; модуль упругости $E = 9,5 \cdot 10^9$ Па; коэффициент Пуассона $\mu = 0,32 \dots 0,42$. Кинематическое граничное условие – отсутствие перемещений торца заготовки, прилегающего к патрону в осевом направлении.

Сила закрепления определялась с учетом сил трения и передаточных отношений механизмов патрона. Уравнение сил механизма патрона в общем виде [4]:

$$W = Qi_1i_2i_3,$$

где i_1, i_2, i_3 – передаточные отношения сил рычажных и центрирующего клиноплунжерного механизмов.

На рис. 11 (см. обложку) приведено графическое представление результатов расчетов.

Для более наглядного представления масштаб деформаций увеличен.

Результаты расчетов для глубин резания $t = 2; 1,5; 1$ мм представлены в табл. 2.

Для проверки расчетных данных и возможности применения метода конечных элементов проведено экспериментальное исследование. В экспериментальных исследованиях подтвержден тот факт, что полученные максимальные значения деформаций и их распределение, соответствуют расчетным.

Измерение деформаций проводилось самоцентрирующим нутромером TESA IMICRO. Наружный диаметр 29,5(-0,050) мм, внутренний диаметр 25(+0,052) мм и длина заготовки $L = 40(-0,2)$ мм измерялись в трех точках в местах зажима кулачками патрона и между кулачками в свободном состоянии и после закрепления в патроне. Результаты измерений представлены в табл. 3.

$\theta_{\text{МКЭ}}$ – максимальное расчетное значение деформации, полученное методом конечных элементов: $\theta_{\text{МКЭ}} = 63$ мкм; θ_3 – экспериментальное значение деформации: $\theta_{\text{МКЭ}} = 70$ мкм; относительная погрешность полученных расчетных значений не превышает 10 %.

Сопоставление расчетных данных с результатами, полученными в ходе эксперимента, дает возможность сделать вывод, что расчет методом конечных элементов позволяет с высокой точностью определять деформации заготовок от сил закрепления.

Следует отметить, что в случае превышения силы закрепления при выбранных режи-

2. Деформации и напряжения от сил зажима в трехкулачковом патроне в зависимости от глубины резания

№ п/п	Подача S_0 , мм/об	Глубина резания t , мм	Сила зажима W , Н	Максимальная деформация (радиальное направление) δ_{max} , мкм	Квалитет точности (IT)
1	0,5	2,0	7758	208	13 (390 мкм)
2		1,5	5818	120	12 (250 мкм)
3		1,0	3878	95	11 (160 мкм)
4		0,4	1163,88	63	10 (110 мкм)

3. Результаты измерений

№ п/п	В свободном состоянии	В зажатом состоянии в области контакта с кулачками патрона	В зажатом состоянии между кулачками патрона	Максимальная деформация
1	25,030	24,970	25,050	70 мкм
2	25,032	24,980	25,070	
3	25,035	24,990	25,080	

мах резания, расчетной силы зажима, определенной из условий точности выполняемой операции, требуется внести соответствующие коррективы: изменить схему установки и закрепления заготовки, режимы резания и условия выполнения операции, вследствие чего возможно уменьшение первоначальных значений погрешности закрепления и получаемой погрешности формы.

Предлагаемая методика расчета дает возможность учесть и оценить погрешности закрепления заготовок на стадии подготовки технологического процесса, в зависимости от выбранного приспособления, режимов резания, геометрии заготовки, схемы закрепления и других необходимых параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Басов К.А. Ansys: справочник пользователя. М.: ДМКПресс, 2005. 640 с.
2. Барановский Ю.В., Брахман Л.А. Режимы резания металлов: справочник. М.: НИИТавтопром, 1995. 456с.
3. Якупов Н.М., Галыев Ш.Ш., Хисамов Р.З. Метод исследования напряженно-деформированного состоя-

ния конструкций сложной геометрии // Вестник РУДН, спец. выпуск «Геометрия и расчет». 2002. №1. С. 27–31.

4. Султан-заде Н.М., Окунев В.С. Оптимизация технологического процесса изготовления деталей по критерию минимума технологических переходов// Научные технологии в машиностроении. 2015. №11(53). С. 37–42.

REFERENCES

1. Basov K.A. Ansys: user reference book. Moscow: DMK Press, 2005. 640p.
2. Baranovskiy Yu.V., Brakhman L.A. Modes of metal cutting. Moscow: NIITavtoprom, 1995. 456 p.
3. Yakupov N.M., Galyaviev Sh.Sh., Khisamov R.Z. Method of investigation the stress-strain state of the structures of complex geometry. *Bulletin of People's Friendship University, special issue "geometry and calculation"*. 2002. №1. Pp. 27–31.
4. Sultan-zade N.M., Okunев V.S. Optimization of technological process of parts production on criterion of machining steps. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2015. No. 11(53). Pp. 37–42.

Рецензент д.т.н. А.Ю. Албагачиев

Редакция журнала приносит свои извинения авторам за ошибку, допущенную в №1(55)-2016 г., стр. 25, и публикует таблицу к статье С.М. Братана, С.Е. Сазонова, А.Г. Колесова «Моделирование процессов доводки абразивными пастами»

Зернистость и гранулометрический состав алмазных микропорошков

Обозначение зернистости	Закон распределения радиусов зерен	Содержание фракций по количеству зерен					
		Крупной	Не более 5 %	Основной	Не более 65 %	Мелкой	Не более 30 %
60/40	близок к лог-нормальному	80 – 60	5	60 – 40	65	40 – 20	30
40/28		60 – 40	5	40 – 28	65	28 – 14	30
28/20		40 – 28	5	28 – 20	65	20 – 10	30
20/14		28 – 20	5	20 – 14	65	14 – 7	30
14/10	близок к нормальному	14 – 10	5	10 – 7	85	7 – 3	10
7/5		10 – 7	5	7 – 5	85	5 – 2	10
5/3		7 – 5	6	5 – 3	87	3 – 1	7
3/2		5 – 3	6	3 – 2	88	2 и мельче	6
2/1		3 – 2	6	2 – 1	88	1 и мельче	6
1/0		2 – 1	–	от 1 и мельче не менее 90%	–	–	–