

УДК 621.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕЩЕНИЙ ЗАГОТОВКИ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ЗАКРЕПЛЕНИЯ
ПРИ БАЗИРОВАНИИ ПО ПЛОСКОСТИ****М. Ф. ПАШКЕВИЧ, В. М. ПАШКЕВИЧ, М. Н. МИРОНОВА***Государственное учреждение
высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет», г. Могилев*

При закреплении заготовки в приспособлении на нее воздействуют некоторой силой Q . В результате в направлении действия этой силы возникают перемещения в связи с деформациями элементов приспособления, воспринимающих эту силу, а также деформациями заготовки и стыков звеньев цепи *заготовка – установочные элементы – корпус приспособления*. Из всех вышеперечисленных перемещений наибольшую величину имеют перемещения в стыке «заготовка – установочные элементы». Контактные деформации в постоянных сопряжениях приспособления и деформации сжатия заготовки и деталей приспособления малы.

Наличие перемещений заготовки под действием некоторой силы при закреплении в приспособлении, если их направление совпадает с направлением выполняемого размера, предопределяет смещение измерительной базы и, как следствие, появление погрешности закрепления.

Известно, что зависимость между контактными деформациями в стыках «заготовка – опора приспособления» и действующей силой Q выражается эмпирическим законом [1]:

$$y = CQ^n, \quad (1)$$

где n – показатель степени, характеризующий особенности стыка; C – коэффициент, зависящий от вида контакта, материала, шероховатости поверхностей, их твердости и т. д.

Аналитическое определение показателей n и C затруднительно, поэтому их величины обычно находят экспериментально.

По зависимости (1) можно исследовать жесткость узлов станочного приспособления. В случае использования зажимных устройств, у которых величины упругого отжатия прямо пропорциональны приложенным силам (винтовые, клиновые, эксцентриковые и другие устройства), необходимо располагать жесткостями установочных и зажимных устройств, так как величины этих жесткостей входят в математические зависимости для определения сил закрепления заготовок.

Первые исследования контактной жесткости были выполнены К. В. Вотинковым, А. П. Соколовским, Д. Н. Решетовым, В. М. Кованом, В. С. Корсаковым, Х. Опитцом, В. Хелкином, Н. Нойвалером, И. Бильфельдом и др. Особое внимание было уделено изучению жесткости элементов технологической системы (станка, приспособления, детали и инструмента).

К. В. Вотинков, изучая жесткость металлорежущих станков, выполнил эксперименты по выявлению зависимости контактной жесткости от величины нагрузки и шероховатости поверхности [2].

Большое значение для понимания вопросов контактной жесткости сыграло исследование А. П. Соколовским контактных деформаций образцов с микронеровностями [3].

Н. Б. Демкин, моделируя шероховатую поверхность набором сферических выступов, рассмотрел задачу об упругом контакте поверхностей с учетом шероховатости в продольном и поперечном направлениях [4].

Д. Н. Решетов, З. М. Левина и В. В. Каминская исследовали жесткость стыков при повторных нагружениях [5]. Для плоских стыков при центральном нагружении было установлено, что сближение их поверхностей связано с давлением степенными зависимостями.

Г. Е. Чихладзе [6] исследовал влияние масштабного фактора на контактную жесткость плоских стыков.

Е. Шлоссер, проводивший экспериментальное исследование деформаций при работе стыков на изгиб и кручение, установил, что плоские стыки менее жестки на изгиб, чем на кручение. В своей работе он также показал, что при расчете деформаций стыков необходимо учитывать направления штрихов обработки контактирующих поверхностей [7].

И. Т. Гусев [8] установил зависимости контактной жесткости при внецентренном нагружении, когда одна поверхность гладкая, вторая – шероховатая, а также когда обе поверхности шероховатые.

Исследования, выполненные Н. М. Михиным и Г. Я. Рамишвили [9], показали, что различия в величинах контактной жесткости при статическом нагружении неподвижных соединений и в условиях их движения (скользящего контакта) сравнительно малы и достигают 15–20 %. Это обстоятельство свидетельствует о ценности метода изучения контактной жесткости при статическом нагружении неподвижных соединений.

Контактные деформации при закреплении заготовок в приспособлениях с установкой на различные типы опор изучал В. С. Корсаков [10]. При расчетах погрешностей закрепления в случае упруго-пластического контактирования заготовки с опорами он исходил из степенной зависимости между контактными деформациями и силой, приходящейся на опору. Подобные зависимости рекомендовал использовать М. М. Абдель Аал [11] для определения величины смещения заготовки в результате контактных деформаций при закреплении в призме, а также при установке заготовки в центрах. Он также рассматривал случай внецентренного приложения зажимной силы.

М. А. Калинин [12] рассматривал подобные зависимости при закреплении заготовок в центрах.

На основе исследований контактных деформаций при закреплении заготовок в приспособлениях с установкой на различные типы опор авторами строились расчетные модели, которые постепенно совершенствовались за счет увеличения числа учитываемых факторов.

Так, например, в справочнике [10] при установке стальной заготовки на постоянные сферические опоры для определения смещения вследствие контактных деформаций стыка «заготовка – опоры приспособления» представлено следующее выражение:

$$y = \left[0,67 + \frac{6,23}{r} - 0,003HВ \right] \left(\frac{Q}{9,8} \right)^{0,8}, \quad (2)$$

где r – радиус сферической поверхности опоры, мм; НВ – твердость материала заготовки по Бринеллю; Q – сила, действующая по нормали к опоре, Н.

Для опоры с насеченной головкой при установке стальной заготовки:

$$y = [0,38 + 0,034D - 0,004\text{НВ}] \left(\frac{Q}{9,8} \right)^{0,6}, \quad (3)$$

где D – диаметр опоры, мм.

Для опоры с плоской головкой или опорной пластины при установке стальной заготовки:

$$y = [0,004R_z - 0,0016\text{НВ} + 0,4 + 0,012F] \left(\frac{q}{9,8} \right)^{0,7}, \quad (4)$$

где q – давление на поверхности контакта, Н/см²; R_z – параметр шероховатости поверхности заготовки, мкм; F – площадь контакта опоры с заготовкой, см².

В работе В. В. Микитянского [13] представлены приведенные ниже зависимости для определения смещений заготовки под действием сил закрепления.

Если опора сферическая, то смещение заготовки равно

$$y = 82 \cdot 10^2 \left(\frac{\theta^2 Q^2}{r_n} \right)^{1/3} + R_{\max} \left(\frac{Q^{1/3}}{3,3\pi \cdot \text{НВ} (\theta \cdot r_n)^{2/3}} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

где θ – упругая постоянная материалов заготовки и опоры, ГПа⁻¹; R_{\max} – параметр шероховатости поверхности заготовки, мкм; НВ – твердость материала заготовки по Бринеллю; r_n – радиус изношенной сферической опоры (для новой опоры $r_n = r$), мм, причем

$$r_n = \frac{r^2}{r - 8u}, \quad (6)$$

где u – линейный износ опоры (при использовании опор, не бывших в эксплуатации $u = 0$), мм;

$$\theta = \frac{1 - \mu_0^2}{E_0} - \frac{1 - \mu_3^2}{E_3}, \quad (7)$$

где μ_0, μ_3 – коэффициенты Пуассона материалов опоры и заготовки; E_0, E_3 – модули упругости материалов опоры и заготовки, ГПа.

Если используется опора с насеченной головкой, то смещение заготовки выражается зависимостью

$$y = R_{\max} \left(\frac{Qt^2}{\pi D^2 (b_1 + 2u)^2 + \text{НВ}} \right)^{1/3}, \quad (8)$$

где D – диаметр опоры, мм; t, b_1 – параметры формы рифлений на опоре, мм.

Если опора плоская или в качестве опоры используется опорная пластина, то смещение заготовки описывается уравнением

$$y = (4 + R_{\max}) \left(\frac{Q}{AC'\sigma_T b_\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2+v_3}} + 2,8R_{B3}^{1/3} \left(\frac{W_3 \theta Q}{A} \right)^{2/3}, \quad (9)$$

где A – номинальная площадь опоры, мм²; σ_T – предел текучести материала заготовки, МПа; C' – коэффициент стеснения, характеризующий степень упрочнения поверхностных слоев обработанных баз заготовки [13, табл. 4]; R_{B3} – длина волны профиля поверхности заготовки [13, табл. 4], мкм; W_3 – высота волны профиля поверхности заготовки [13, табл. 4], мкм; b_ε – приведенный параметр кривой опорной поверхности, характеризующий условия контакта базы заготовки с опорой, и определяющийся соотношением

$$b_\varepsilon = \frac{0,24(0,4 - 0,1v_3)b_3(4 + R_{\max})^{2+v_3}}{R_{\max}^{v_3}}, \quad (10)$$

где v_3, b_3 – безразмерные параметры кривой опорной поверхности заготовки [13, табл. 4].

В свою очередь, в справочнике [1] для определения смещения вследствие контактных деформаций стыка «заготовка – опоры приспособления» представлены следующие зависимости:

– для сферических опор:

$$y = 8,2 \left(\frac{\theta^2 Q^2}{r_n} \right)^{1/3} + 0,46 \cdot R_{\max} \left(\frac{Q^{1/3}}{3,3\pi \text{HB}(\theta r_n)^{2/3}} \right)^{1/3}; \quad (11)$$

– для опоры с насеченной головкой:

$$y = 0,46 \cdot R_{\max} \left(\frac{Q t^2}{\pi D^2 (b_1 + 2u)^2 \text{HB}} \right)^{1/3}; \quad (12)$$

– для плоских опор и опорных пластин:

$$y = (4 + R_{\max}) \left(\frac{100Q}{AC'\sigma_T b_\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2+v_3}} + 0,13R_{B3}^{1/3} \left(\frac{W_3 \theta Q}{A} \right)^{2/3}. \quad (13)$$

Проанализируем расчетные зависимости (2)–(13) и построим их графики в виде $y = f(Q)$ при установке заготовки с шероховатостью базовой поверхности $Ra = 0,962$ мкм и твердостью 156 НВ, изготовленной из стали 45 ($\sigma_T = 360$ МПа) на неизношенные точечные опоры с плоской, рифленой и сферической рабочей поверхностью диаметром 12 мм. Эти графики представлены на рис. 1.

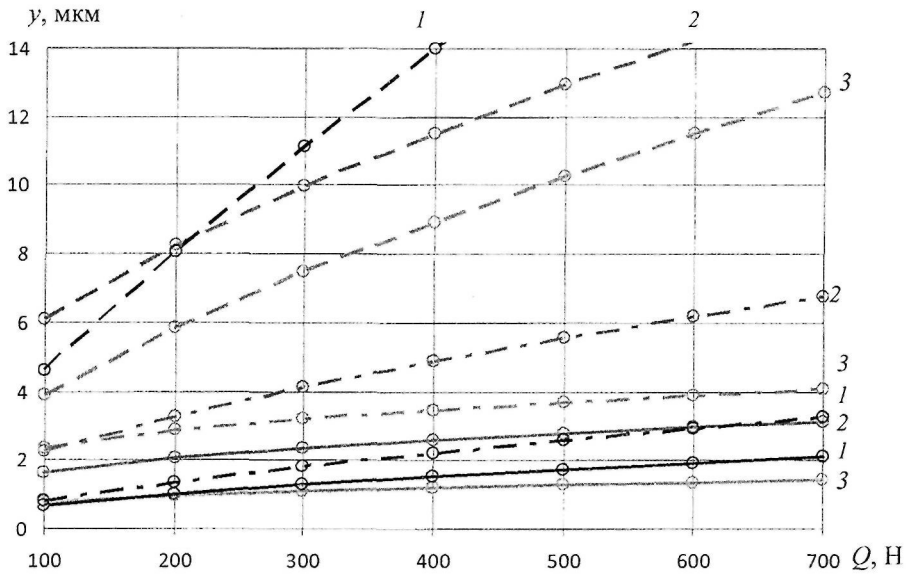


Рис. 1. Зависимости смещения заготовки от прикладываемой нагрузки, приходящейся на одну опору: —○— сферическая опора; —○— рифленая опора; —○— плоская опора: 1 — А. Г. Косилова; 2 — В. В. Микитянский; 3 — Б. Н. Вардашкин

Из рис. 1 видно, что полученные различными авторами результаты значительно отличаются друг от друга. Отсутствие однозначности в рассматриваемых зависимостях требует их экспериментальной проверки и корректировки.

Экспериментальные исследования смещений заготовки под действием сил закрепления при ее базировании по плоскости выполнялись на специальной установке, фотография которой приведена на рис. 2.

Установка содержит основание 1, в котором выполнены отверстия, позволяющие устанавливать сменные опоры, и центральный винт 2, служащий для нагружения жесткой заготовки 3 различными силами закрепления при помощи вращения гайки 4.

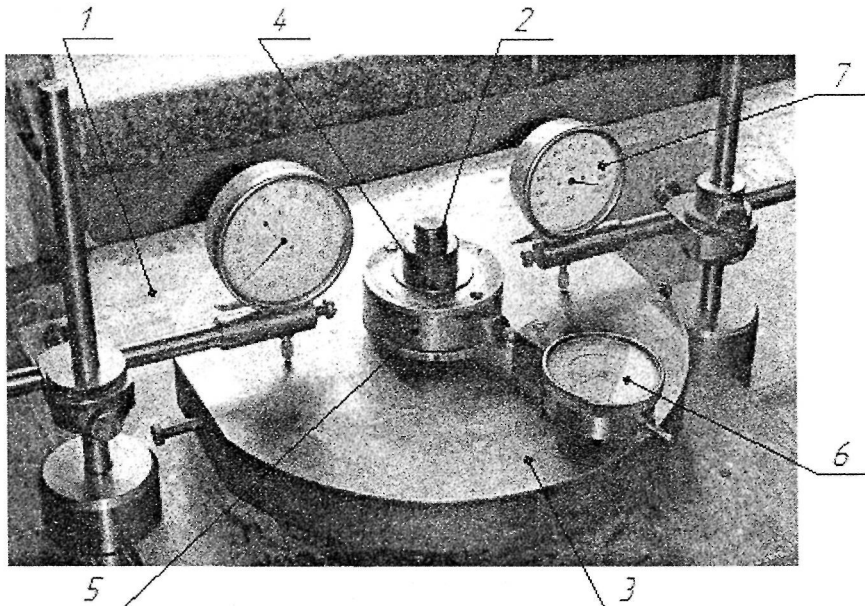


Рис. 2. Установка для определения смещений заготовки под действием сил закрепления при базировании по плоскости: 1 — основание; 2 — центральный винт; 3 — заготовка; 4 — гайка; 5 — динамометр сжатия; 6, 7 — индикаторы

Для измерения перемещений верхней плоскости заготовки в вертикальном направлении служат индикаторы 7, закрепленные на стойках, расположенных на основании установки.

Величина силы закрепления измеряется при помощи динамометра сжатия 5, снабженного индикатором 6.

Динамометр сжатия состоит из двух фланцев, между которыми размещены тарельчатые пружины. В кольцевой расточке верхнего фланца установлен упорный шарикоподшипник, в который входит соединительная втулка, связывающая в осевом направлении два фланца и создающая начальный натяг тарельчатых пружин. К верхнему фланцу динамометра прикреплена пластина, служащая для установки индикатора, измерительный стержень которого опирается на пластину, прикрепленную к нижнему фланцу.

При проведении эксперимента использовались две стальные заготовки с различной твердостью и шероховатостью базовой поверхности, изготовленные из материала одной поставки.

Шероховатость заготовок определялась с помощью профилометра-профилографа, входящего в многоцелевой исследовательский комплекс «Sharс» (рис. 3), который позволяет вести измерения шероховатости поверхностей, измерения линейных размеров и отклонений формы деталей. Твердость заготовок определялась с помощью твердомера ТПЦ-4.

Для каждого типа опор измерения перемещений проводились при ступенчато изменяющейся нагрузке Q от 0 до 1318 Н. При этом было использовано семь уровней изменения переменной Q и на каждом ее уровне было проведено по пять дублирующих экспериментов.

В ходе исследования устанавливались зависимости величин смещений заготовок от сил закрепления $y = f(Q)$ для различных типов опор. Использовались точечные опоры с плоской, рифленой и сферической рабочей поверхностью диаметром 12 мм, изготовленные из стали 40Х, а также опорные пластины 7034-0474 ГОСТ 4743-68, изготовленные из стали 20Х с твердостью 55–60 HRC. Твердость точечных плоских и сферических опор – 56–61 HRC. Твердость точечных рифленых опор – 41,5–46,5 HRC.

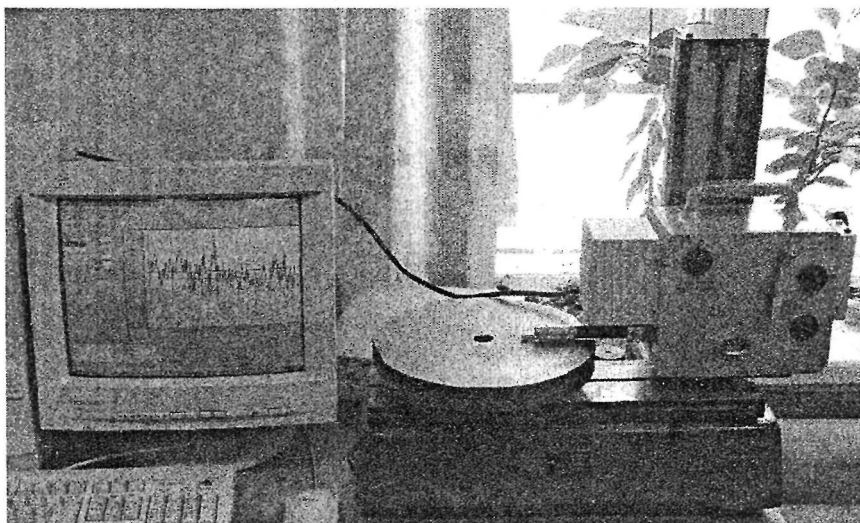


Рис. 3. Определение шероховатости заготовки измерительным комплексом «Sharс»

Результаты исследований смещений заготовок под действием сил закрепления были аппроксимированы степенной функцией, при этом были получены следующие эмпирические зависимости.

Для стальной заготовки со средней шероховатостью базовой поверхности $Ra = 0,542$ мкм и средней твердостью 140 НВ:

– при установке на рифленые опоры $y = 0,036 \cdot Q^{0,722}$; (14)

– при установке на сферические опоры $y = 0,013 \cdot Q^{0,911}$; (15)

– при установке на плоские опоры $y = 0,068 \cdot Q^{0,635}$; (16)

– при установке на опорные пластины $y = 0,066 \cdot Q^{0,665}$. (17)

Для стальной заготовки со средней шероховатостью базовой поверхности $Ra = 0,962$ мкм и средней твердостью 156 НВ для тех же типов опор получены соответственно следующие эмпирические зависимости:

$y = 0,004 \cdot Q^{1,017}$; (18)

$y = 0,021 \cdot Q^{0,857}$; (19)

$y = 0,035 \cdot Q^{0,766}$; (20)

$y = 0,255 \cdot Q^{0,519}$. (21)

Проведенный дисперсионный анализ показал, что коэффициенты регрессионных моделей значимы, а сами модели адекватно описывают экспериментальные данные (на уровне значимости $\alpha = 0,05$).

Графики зависимости смещений заготовки с шероховатостью базовой поверхности $Ra = 0,962$ мкм и твердостью 156 НВ от изменения действующей нагрузки, построенные на основе полученных зависимостей, представлены на рис. 4.

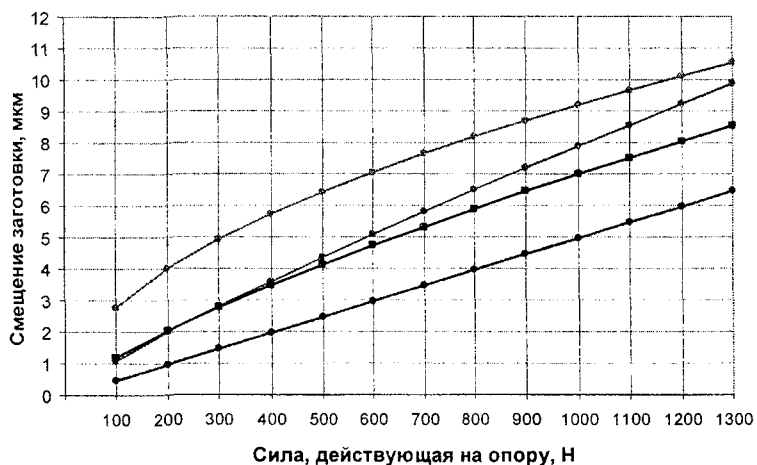


Рис. 4. Зависимости смещения заготовки с шероховатостью базовой поверхности $Ra = 0,962$ мкм и твердостью 156 НВ от прикладываемой нагрузки при установке на различные типы опор: 1 – опорные пластины; 2 – сферическая опора; 3 – плоская опора; 4 – рифленая опора.

Из графиков видно, что увеличение силы закрепления заготовки в приспособлении приводит к увеличению ее смещения независимо от иных условий и что наибольшей жесткостью обладает рифленая опора, а наименьшей – опорные пластины.

Вычисления по полученным эмпирическим зависимостям показали, что значения смещений заготовки y_3 при ее установке на опорных пластинах превышают значения, вычисленные по соответствующим соотношениям, представленным в технической литературе [1], [10], [13]. Расчетные значения смещений заготовки под действием сил закрепления при установке на сферических опорах также превышают экспериментальные, причем величина этого превышения при различных силах Q различная и с увеличением силы возрастает.

При установке заготовки на плоских и рифленых точечных опорах экспериментальные значения ее смещений соответствуют смещениям, вычисленным по зависимостям (3), (4), (8), (9), (12) и (13).

На рис. 5 приведены графики изменения смещений заготовки под действием сил закрепления при установке на плоских опорах, построенные на основе формул (4), (9) и (13) и полученной эмпирической зависимости (20).

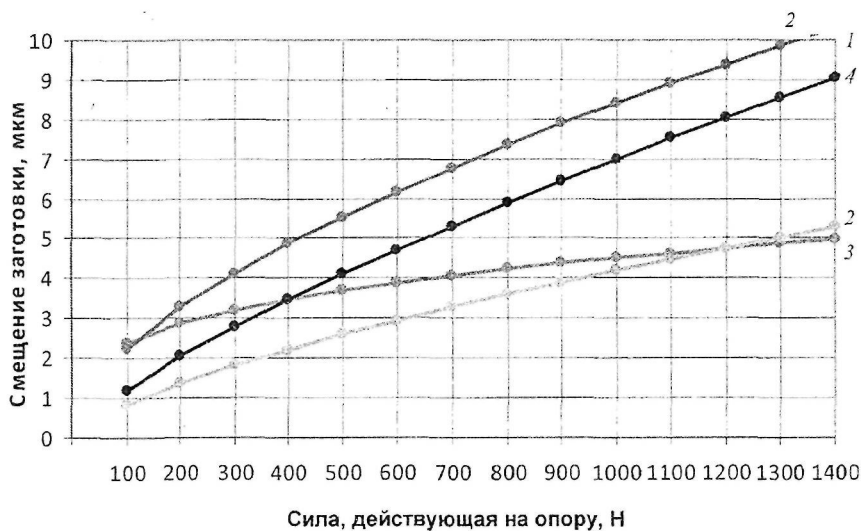


Рис. 5. Зависимости смещения заготовки с шероховатостью базовой поверхности $Ra = 0,962$ мкм и твердостью 156 НВ от прикладываемой нагрузки при установке на плоских опорах: 1 – В. В. Микитянский; 2 – А. Г. Косилова; 3 – Б. Н. Вардашкин; 4 – эксперимент

Следует иметь в виду, что эмпирические зависимости (14)–(21) справедливы в рамках тех условий, которые были реализованы при проведении эксперимента. Для других условий они могут давать существенные отклонения и пользоваться ими целесообразно только при весьма приближенной оценке значений y .

Связь между расчетными y_p и экспериментальными смещениями заготовок y_3 можно выразить соотношением

$$y_3 = k \cdot y_p,$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий факторы, которые не участвуют в вычислениях смещений по расчетным зависимостям.

В таблице представлены зависимости вида $k = f(Q)$ для корректировки различных формул при закреплении заготовок с шероховатостью базовой поверхности

$Ra = 0,962$ мкм и твердостью 156 НВ, а также с $Ra = 0,542$ мкм и 140 НВ и использовании различных типов опор.

Расчетные зависимости поправочного коэффициента

Наименование опор	Коэффициент k для формул		
	(11)–(13)	(5), (8), (9)	(2)–(4)
Заготовка с шероховатостью базовой поверхности $Ra = 0,962$ мкм и твердостью 156 НВ			
Сферическая опора	$k = 0,277755 + 0,000278Q$	$k = 0,172033 + 0,000314Q$	$k = 0,236493 + 0,0000439Q$
Плоская опора	$k = 0,438297 + 0,001304Q$	$k = 0,535138 + 0,00039Q$	$k = 1,430158 + 0,000307Q$
Рифленая опора	$k = 0,424637 + 0,002921Q$	$k = 0,195333 + 0,001344Q$	$k = 0,655809 + 0,001471Q$
Опорные пластины	$k = 1,148873 + 0,001124Q$	$k = 1,260248 - 0,0002Q$	$k = 3,29732 - 0,00152Q$
Заготовка с шероховатостью базовой поверхности $Ra = 0,542$ мкм и твердостью 140 НВ			
Сферическая опора	$k = 0,229814 + 0,000274Q$	$k = 0,166221 + 0,000299Q$	$k = 0,172849 + 0,0000665Q$
Плоская опора	$k = 0,654646 + 0,001099Q$	$k = 0,616475 + 0,0000843Q$	$k = 1,317499 - 0,00025Q$
Рифленая опора	$k = 2,091085 + 0,004159Q$	$k = 0,9619 + 0,001913Q$	$k = 1,079278 + 0,000461Q$
Опорные пластины	$k = 0,721405 + 0,001377Q$	$k = 0,686913 - 0,000165Q$	$k = 1,471208 - 0,00015Q$
Среднее значение k			
Сферическая опора	$k = 0,253785 + 0,000276Q$	$k = 0,169127 + 0,000307Q$	$k = 0,204671 + 0,0000552Q$
Плоская опора	$k = 0,546472 + 0,001202Q$	$k = 0,575807 + 0,000237Q$	$k = 1,373829 + 0,0000285Q$
Рифленая опора	$k = 1,257861 + 0,00354Q$	$k = 0,578616 + 0,001629Q$	$k = 0,867544 + 0,000966Q$
Опорные пластины	$k = 0,935139 + 0,001251Q$	$k = 0,97358 - 0,000017Q$	$k = 2,384264 - 0,00083Q$

Полученные расчетные зависимости поправочного коэффициента позволяют уточнить формулы (2)–(5), (8), (9), (11)–(13), определяющие смещения заготовок при установке на различные типы опоры.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований были получены эмпирические зависимости смещений в стыке «заготовка – опора приспособления» от сил закрепления, позволяющие вести технические расчеты по упрощенной методике. Эти зависимости позволяют определить значения перемещений, а также сравнить их с теоретическими значениями и найти соответствующую погрешность закрепления заготовки в приспособлении.

Литература

1. Станочные приспособления : справочник : в 2 т. / А. И. Астахов [и др.] ; под ред. Б. Н. Вардашкина, А. А. Шатилова. – Москва : Машиностроение, 1984. – Т. 1. – 592 с.
2. Вотинов, К. В. Жесткость станков / К. В. Вотинов. – Москва : ЛОНИТОМАШ, 1940. – 178 с.
3. Соколовский, А. П. Научные основы технологии машиностроения / А. П. Соколовский. – Москва : Машгиз, 1955.



4. Демкин, Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей / Н. Б. Демкин. – Москва : Изд-во АН СССР, 1962.
5. Каминская, В. В. Станины и корпусные детали металлорежущих станков / В. В. Каминская, З. М. Левина, Д. Н. Решетов. – Москва : Машгиз, 1960.
6. Чихладзе, Г. Е. Экспериментальное исследование жесткости плоских стальных стыков / Г. Е. Чихладзе // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1962. – № 4. – С. 49–54.
7. Рыжов, Э. В. Контактная жесткость деталей машин / Э. В. Рыжов. – Москва : Машиностроение, 1966. – 195 с.
8. Гусев, И. Т. Деформация стыков при многократном их нагружении / И. Т. Гусев // Новые исследования в области обработки резанием металлов и пластмасс : науч. тр. / Моск. механ. ин-т. – Москва : Машгиз, 1952. – № 4.
9. Михин, Н. М. Новый метод определения сближения и контактного предварительного смещения твердых тел / Н. М. Михин, Г. Я. Рамишвили // Трение твердых тел. – Москва : Наука, 1964.
10. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / В. Б. Борисов [и др.] ; под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 656 с.
11. Абдель Аал, М. М. Исследование жесткости станочных приспособлений : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. М. Абдель Аал ; МВТУ им. Баумана. – Москва, 1963.
12. Калинин, М. А. Погрешности установки на станках токарной группы / М. А. Калинин // Сб. науч. тр. / ГОСИНТИ, 1962. – Вып. 32.
13. Микитянский, В. В. Точность приспособлений в машиностроении / В. В. Микитянский. – Москва : Машиностроение, 1984. – 128 с.

Получено 05.03.2010 г.