

УДК 539.3

ИЗУЧЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ В МОДЕЛЯХ НАПРАВЛЯЮЩИХ СТАНКОВ МЕТОДОМ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

Сердобинцев Ю.П., Кухтик М.П.

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград,
e-mail: mpkuhtik@gmail.com*

Статья посвящена исследованию перемещений и величины сближения моделей прямоугольных направляющих скольжения станков. В процессе проведения экспериментов по определению контактных перемещений на рабочие поверхности моделей направляющих были нанесены износостойкие гетерогенные покрытия, которые затем были подвергнуты черновому и чистовому шлифованию. Нормальные и тангенциальные перемещения в моделях направляющих создавались и измерялись с помощью нагрузочного стенда. Для измерения величин сближения контактирующих деталей с покрытиями и оценки влияния перфорации контактирующих элементов на трансформацию упругой линии контакта, разработана методика регистрации перемещений и величин сближения любых точек, принадлежащих контактирующим телам, методом спекл-фотографии. Было выявлено, что перфорация контактирующих деталей круговыми отверстиями вблизи зоны контакта является эффективным конструктивным приемом в повышении сдвигоустойчивости затянутых соединений и их сопротивления фреттинг-коррозии. Результаты, полученные на моделях, позволяют определить величины сближений, вертикальные перемещения, деформации и напряжения в натурной конструкции в условиях контактного упругопластического взаимодействия шероховатых поверхностей деталей с учетом закономерностей подобия. Полученный критерий подобия пластической зоны позволяет моделировать как геометрические характеристики поверхности, так и ее физико-механические свойства.

Ключевые слова: гетерогенные покрытия, контактные деформации, спекл-фотография, полосы Юнга

A STUDY OF CONTACT STIFFNESS IN MODELS OF MACHINE TOOL SLIDEWAYS BY METHOD OF SPECKLE PHOTOGRAPH

Serdobintsev Yu.P., Kukhtik M.P.

Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: mpkuhtik@gmail.com

The article is devoted to a study of displacements and value of approach of models of rectangular slideways of machine tools. During carrying out the experiments on determining contact displacements wearproof heterogeneous coatings have been deposited on operating surfaces of models of slideways. Then these coatings were treated by rough and finish grinding. Normal and tangential displacements in models of slideways have been made and measured with the help of the load stand. The technique of registration of displacements and values of approach of any points of contacting bodies by the method of speckle photograph have been developed for measuring of values of approach of contacting parts with coatings and for evaluation of influence of perforation of contacting elements on transformation of elastic contact curve. It has been revealed that perforation of contacting parts by circular holes nearby the contact area is effective constructive method in increasing shear resistance of tightened joints and their resistance to fretting corrosion. The results, which have been obtained on the models, allow to determine values of approaches, vertical displacements, deformations and stresses in full-scale structure under the conditions of contact elastoplastic interaction of rough surfaces of parts taking into account regularities of similarity. The obtained similarity criterion of plastic area allow to model both geometrical characteristics of a surface and its physical and mechanical properties.

Keywords: heterogeneous coatings, contact deformations, speckle photograph, Young's fringes

Ограничения, накладываемые аналитическими методами при исследовании контактных перемещений для тел с неоднородными гетерогенными покрытиями, а также для контактирующих деталей со сложной геометрической формой, могут быть преодолены при использовании современных высокоточных оптических методов регистрации полей напряжений, деформаций и перемещений – голографической интерферометрии [1–3] и спекл-фотографии [4–6], а также при комплексном использовании различных методов фотомеханики и расчетных методов. Метод спекл-фотографии обычно обладает меньшей чувствительностью по сравнению с голографической интерферометрией [7], но его чувстви-

тельностью можно варьировать в процессе считывания оптической информации. Нормальные к поверхности детали деформации с наибольшей степенью чувствительности регистрируются методом голографической интерферометрии, тогда как деформации в плоскости поверхности детали предпочтительно измерять с помощью спекл-фотографии. Эти соображения, а также сравнительная простота проведения экспериментов определили выбор метода спекл-фотографии для изучения контактной жесткости в моделях направляющих станков.

Целью работы является исследование перемещений и величины сближения моделей прямоугольных направляющих скольжения станков.

Характеристики испытываемых образцов

№ п/п	Материал образца	Материал покрытия	Способ нанесения	Толщина покрытия, мм	Шероховатость рабочих поверхностей R_a , мкм	Твердость покрытия
1	2	3	4	5	6	7
1	СЧ 21 (ГОСТ 1412-85)	СНГН (ГОСТ 28844-90)	газоплазменное	0,35	0,63	580–590 (HV)
2	Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	подслой + СНГН	без оплавления	0,40	0,72	575–590 (HV)
3	СЧ 21	СНГН	газоплазменное	0,45	0,65	1150–1180 (H_{50})
4	Сталь 45	СНГН	— —	0,43	0,55	1070–1130 (H_{50})
5	БР ОЦС 5-5-5 (ГОСТ 613-79)	Ni-Cu-Zn B-Si-Cr	газоплазменное с оплавлением горелкой	0,38	0,83	50–52 (HRC ₃)
6	БР ОЦС 5-5-5	Ni-Cu-Zn B-Si-Cr	— —	0,42	0,76	50–52 (HRC ₃)
7	Сталь 45	Fe-Ni-Cr B-Si-Mn	— —	0,29	0,64	53–55 (HRC ₃)
8	Сталь 45	Ni-Cr-Zn B-Si	— —	0,34	0,66	49–52 (HRC ₃)
9	Сталь 45	твердый хром	гальванический	0,43	0,70	1023 (HRC ₅₀)
10	Сталь 45	твердый хром	— —	0,29	0,58	1023 (HRC ₅₀)

Материалы и методы исследования

В процессе проведения экспериментов по определению контактных перемещений были изготовлены образцы кубической формы с ребром $l = 40$ мм. В центре граней куба профрезерованы пазы, параллельные граням шириной 14 мм и глубиной 2 мм так, что две выступающие прямоугольные площадки шириной 13 мм и длиной 40 мм образуют рабочие опорные поверхности, моделирующие наиболее простые и удобные при сборке прямоугольные направляющие скольжения станков. Размеры образцов выбраны из удобства проведения экспериментов по определению перемещений оптическими методами.

На рабочие, предварительно шлифованные поверхности моделей направляющих наносят износостойкие гальванические, газоплазменные и плазменные покрытия. Затем эти покрытия подвергают черновому и чистовому шлифованию. Материалы образцов, состав, способ нанесения, толщина нанесенного покрытия, твердость и параметры шероховатости направляющих приведены в таблице.

Нагрузочное приспособление (рис. 1) предназначено для создания и измерения нормальной нагрузки. Оно состоит из основания, на котором крепится вертикальная нагрузочная рама. Вертикальная нагрузка P_B на образцы создается гидроцилиндром и измеряется манометром.

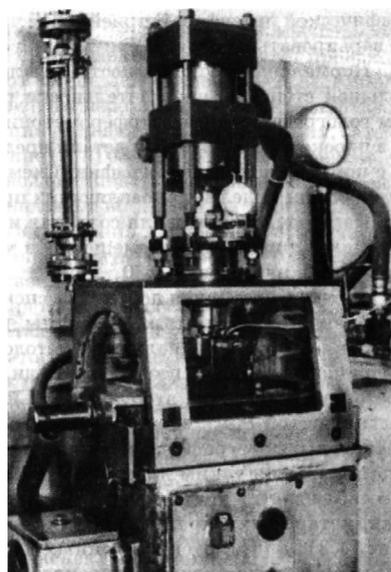


Рис. 1. Нагрузочное приспособление

Для измерения нормальных к поверхности стыка образцов перемещений применялся метод спекл-фотографии [6]. Характерная зернистая картина спеклов, возникающая на поверхности испытываемых образцов, приведена на рис. 2. Она состоит из мелких светлых и темных пятен, получающихся в результате интерференции рассеянного поверхностью света, и носит статистический характер, зависящий от структуры поверхности и способа наблюдения.

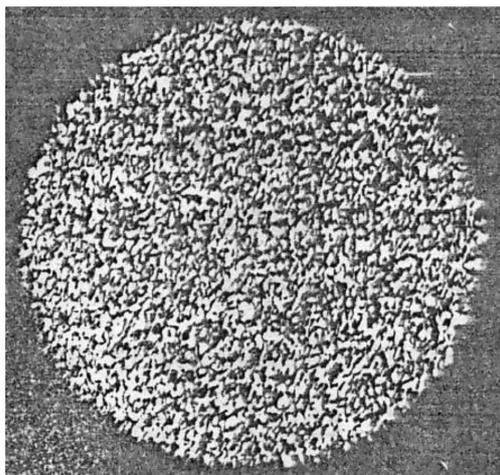


Рис. 2. Характерная зернистая картина спеклов, возникающая на поверхности испытываемых образцов

Спекл-фотография выполнялась на фотопластинке размерами 9x12 см.

Схема регистрации спекл-фотографии моделей направляющих приведена на рис. 3. Нагрузочный стенд для создания и измерения нормальных и тангенциальных перемещений в моделях направляющих показан на рис. 4.

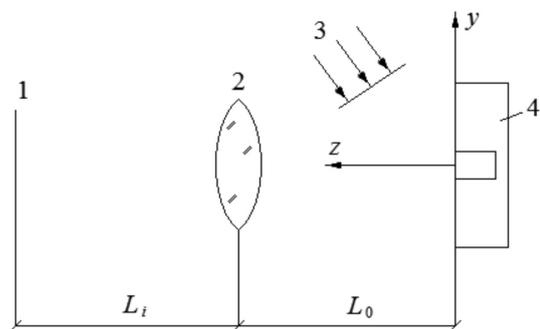


Рис. 3. Оптическая схема для регистрации спеклов на образцах: 1 – плоскость изображения; 2 – линза; 3 – лазерный освещающий пучок; 4 – исследуемый объект

В качестве источника света для получения спекл-картины применяли лазер ЛГ-215 с длиной волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм. Спекл-фотографии получали методом двойной экспозиции, причем первую экспозицию делали при ненагруженном состоянии моделей, а вторую – при их деформации вертикальной силой P_v .

Полученная спекл-фотограмма обрабатывается методом точечного сканирования узким лазерным пучком. На матовом экране наблюдается дифракционная картина в виде системы эквидистантных параллельных по-

лос – типа полос Юнга (рис. 5), расположенных по нормали к направлению перемещения точки в плоскости поверхности.

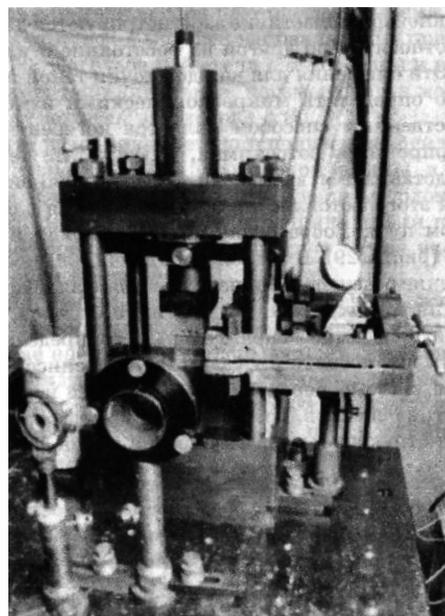


Рис. 4. Нагрузочный стенд для создания и измерения нормальных и тангенциальных перемещений в моделях

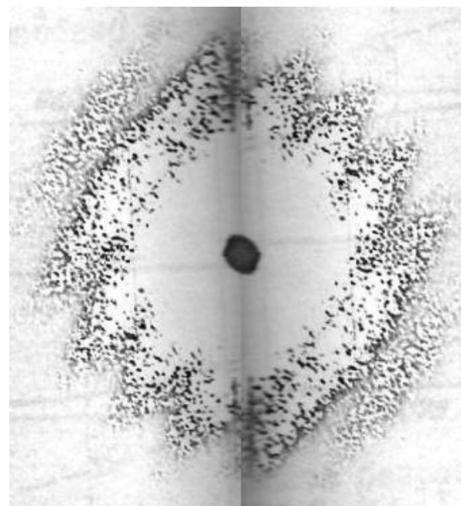


Рис. 5. Полосы Юнга, полученные способом двухэкспозиционной спекл-фотографии для $P_v = 29$ кН

Изображение поверхности элемента в плоскости фотослоя строится линзой с фокусом F и радиусом $R = D/2$. Удаление моделей направляющих от линзы L_0 и расстояние от нее до плоскости изображения L_i связаны зависимостью тонкой лин-

зы $L_0^{-1} + L_1^{-1} = F^{-1}$. Изображение моделей в плоскости фотослоя промодулировано случайной картиной спеклов с характерным размером S , зависящим от линзовой апертуры $S \approx 1,22\lambda L_1 / 2R$. При вертикальном смещении V элемента модели остается неизменной относительная фаза каждого из лучей, образующих спекл [6–8], то есть в плоскости фотопластинки происходит смещение всей картины спеклов на расстояние VM , где M – поперечный масштаб изображения. Идентичное перемещение спеклов будет происходить при горизонтальном смещении элемента на расстояние U .

Для измерения плоского перемещения модели производится двойная экспозиция – сначала до перемещения, затем после него. Если величина смещения (V , U) больше размера спеклов S , то на проэкспонированной фотопластинке регистрируются две смещенные одна относительно другой на расстояние M идентичные картины. Это смещение для каждой точки такой пары спеклов можно определить микроскопическими измерениями. Более действенным способом является когерентно-оптическая интерпретация фотоснимка, в результате чего смещение M представляется в виде интерференционной картины полос. Для этого фотопластинка располагается в сходящемся лазерном пучке, образованном преобразующей линзой с фокусом F . В задней фокальной плоскости линзы распределение освещенности наблюдается в виде яркого центрального пятна, окруженного картиной спеклов, промодулированной полосами с параллельным распределением интенсивности под небольшим углом к оси абсцисс. Эта модулированная система чередующихся светлых и темных линий – картина спеклов, возникающая при деформации света на спекл-структуре, зарегистрированной на фотопластинке с высокоразрезающей голографической эмульсией «Микрат», ЛОИ-2 или ВРЭ. Для получения высокой дифракционной эффективности спекл-фотография экспонируется и проявляется по методике, обеспечивающей высокую контрастность, например при отбеливании спекл-фотографии. Интерференционные полосы с конусоидальным распределением обусловлены действием соответственно каждой пары спеклов, идентичным действием пары одинаковых источников когерентного света, образующих полосы Юнга. Так как все спеклы во всех парах расположены на одинаковом расстоянии $M(V, U)$, то все полосы Юнга совпадают, образуя конечную картину интерференционных полос (рис. 5).

Обработка этой картины полос, полученной с помощью двухэкспозиционной спекл-фотографии, производится с учетом их нормальной ориентации к вектору P^B перемещения в плоскости исследуемой детали. Согласно [8], если расстояние между спеклами в каждой паре на фотоснимке составляет L_3 , то промежуток между полосами $L_F = \lambda F / L_S$; с учетом последнего перемещение исследуемого элемента в плоскости определится выражением

$$u_i = \lambda F / L_F M \quad (i = 1, 2), \quad (1)$$

где u_1 и u_2 – соответственно вертикальные и горизонтальные перемещения.

Точность измерения перемещений при обработке спекл-картин зависит от точности определения расстояния между центрами полос, которая оценивается в 2–3%. Деформации, получаемые дифференцированием графика перемещений, имеют погрешность $\pm 10\%$.

Количественный анализ спекл-фотографии проводили методом поточечного сканирования на специальной установке. Для этого на исследуемой модели на расстоянии 1 мм от стыка проведены линии, на которых отмечено по девять реперных точек шагом 5 мм (рис. 6).

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ результатов экспериментов по измерению перемещений $\delta = f(l)$ для девяти точек для стальных образцов (рис. 7, а) и образцов с покрытием СНГН (рис. 7, б) позволяет построить обобщенные графические зависимости (рис. 8).

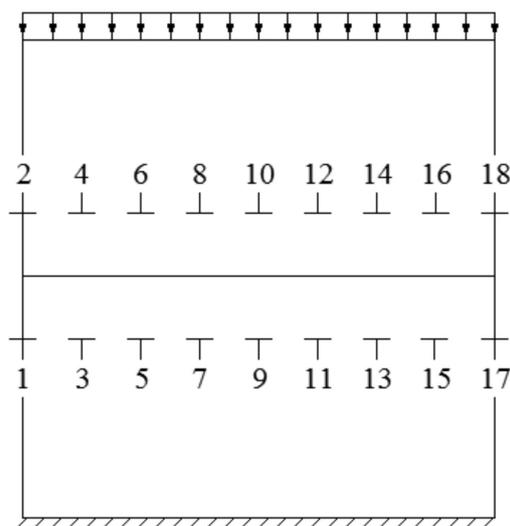


Рис. 6. Схема расположения реперных точек для измерения вертикальных перемещений в образцах

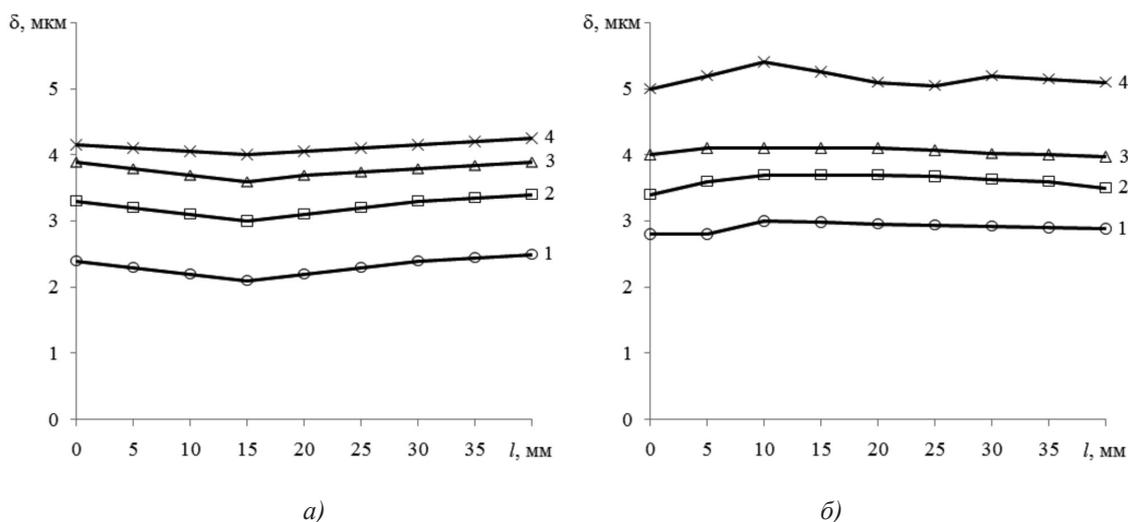


Рис. 7. Распределение вектора вертикальных перемещений для стальных моделей (а) и с покрытием СНГН (б): 1 – для $P_g = 9,4$ кН; 2 – для $P_g = 16,4$ кН; 3 – для $P_g = 29$ кН; 4 – для $P_g = 38,8$ кН

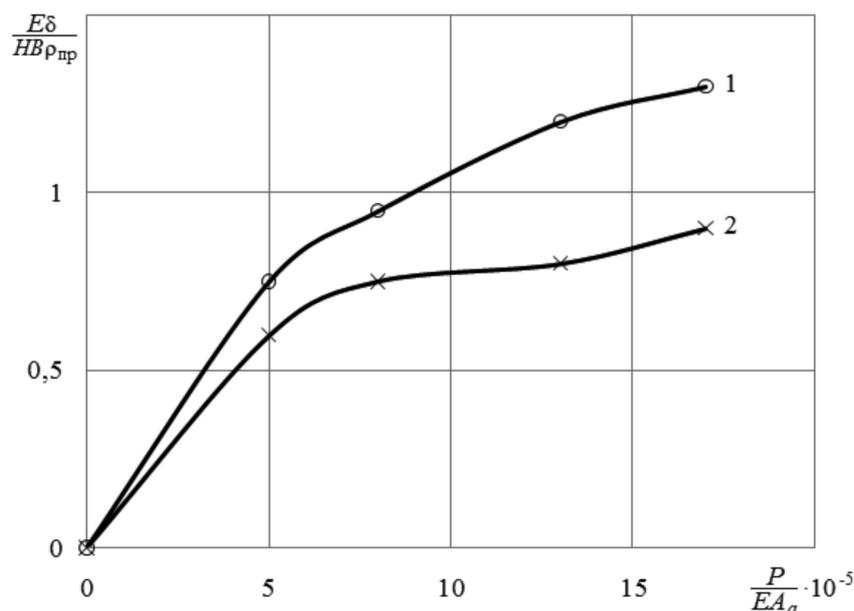


Рис. 8. Зависимости безразмерного сближения от безразмерного параметра нагрузки, где A_a – номинальная площадь контакта: 1 – для образцов с покрытием СНГН; 2 – для образцов без покрытия

Нелинейный характер зависимостей на рис. 8 свидетельствует об упругопластическом деформировании поверхностного слоя образцов, что находится в соответствии с результатами исследований дискретного контакта шероховатых тел [8].

Для моделирования упругопластических контактных деформаций в качестве оценки для определения характера деформации микронеровностей использу-

ют параметр пластичности, предложенный Гринвудом:

$$\frac{E}{HB} \sqrt{\frac{R_a}{\rho}} \geq 1. \quad (2)$$

Согласно этому параметру контакт считается пластичным лишь тогда, когда этот параметр больше или равен единице. Здесь E – модуль упругости, R_a – среднеарифме-

тическое отклонение профиля, HB – твердость по Бринеллю, ρ – средний радиус локальных выступов шероховатости.

Из зависимости (2) имеем $E = HB(\rho/R_a)^{1/2}$, которая может быть на основе теории подобия записана через индикаторы подобия в виде

$$K_{R_a} \cdot K_E^2 / K_{HB}^2 \cdot K_\rho = 1. \quad (3)$$

Согласно этому индикатору имеет место критерий подобия вида

$$(R_a E^2 / HB^2 \rho)_H = (R_a E / HB^2 \rho)_M = \text{idem}. \quad (4)$$

Так как величина контактных сближений δ соизмерима с R_a , то, используя правила подобия, перепишем (4) в виде

$$\left(\frac{\delta E^2}{\rho HB^2} \right)_H = \left(\frac{\delta E^2}{\rho HB^2} \right)_M = \text{idem}. \quad (5)$$

Следовательно, безразмерный комплекс $\delta E^2 / (\rho HB^2)$ является критерием подобия пластической зоны, позволяющим моделировать как геометрические параметры шероховатостей ρ и R_a , так и физико-механические свойства материалов поверхностного слоя E и HB .

С учетом (4) зависимость между напряжениями и деформациями при упруго-пластическом поведении материала можно представить в виде

$$\sigma_{ij} = (1 + \mu)^{-1} \left(\frac{\theta}{1 - 2\mu} + \frac{\varepsilon_{ij}}{2} \right) \cdot HB \left(\frac{\rho}{R_a} \right)^2, \quad (6)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, θ – объемная деформация, μ – линейный интегральный оператор Вольтерра, не зависящий от координат, ε_{ij} – тензор деформации.

Рис. 6, 7 показывают, что максимальные перемещения в образцах с газотермическим покрытием СНГН, оплавленным газовой го-

релкой и имеющим пористость 5–8%, выше на 20%, чем в образцах без покрытия, причем в указанном диапазоне увеличение P_v вызывает рост сближения δ .

В сдвигоустойчивом соединении (рис. 9) [8] перфорация образцов круговыми отверстиями в окрестности контактной границы позволяет целенаправленно изменять упругую линию контакта и, следовательно, увеличивать деформационную составляющую трения покоя. На рис. 10 показаны вертикальные перемещения реперных точек вдоль линии контакта верхнего сплошного и нижнего образца с отверстиями. Кривая 1 на рис. 10 относится к верхнему образцу, а кривая 2 – к нижнему. Анализ этих кривых показывает, что перемещения реперных точек как верхнего, так и нижнего образца несколько больше, чем перемещения точек, расположенных между отверстиями. Отмеченные особенности характерны для образцов моделей направляющих, изготовленных из бронзы марки ОЦС-5-5-5 (таблица), рабочие поверхности которых обработаны шлифованием до 8 класса шероховатости.

Аналогичные результаты получены для всех образцов, приведенных в таблице.

Для иллюстрации распределения вертикальных перемещений модели в области отверстий и между ними в диапазоне $1100 \leq P_v \leq 42300$ Н построены соответствующие зависимости, наиболее характерная из которых приведена на рис. 11. Анализ этого рисунка показывает, что вертикальные перемещения над средним отверстием на 25% выше, чем над крайними, что объясняется взаимовлиянием соседних отверстий. Таким образом, перфорация контактирующих деталей круговыми отверстиями вблизи зоны контакта вызывает волнообразное изменение упругой линии контакта и является эффективным конструктивным приемом в повышении сдвигоустойчивости затянутых соединений и их сопротивления фреттинг-коррозии [8].

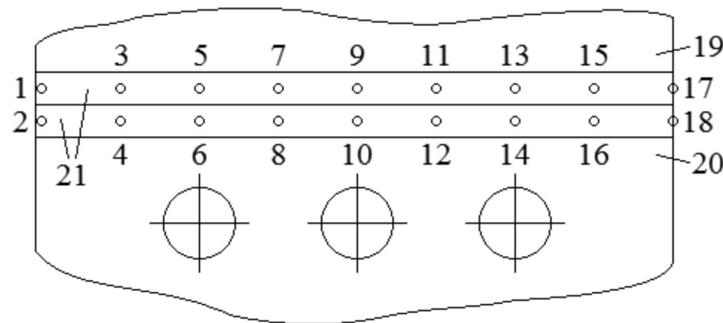


Рис. 9. Схема расположения реперных точек для измерения вертикальных перемещений в контактирующей паре, содержащей многосвязанную область: 1–18 – отверстия, 19 – верхний образец, 20 – нижний образец, 21 – покрытие

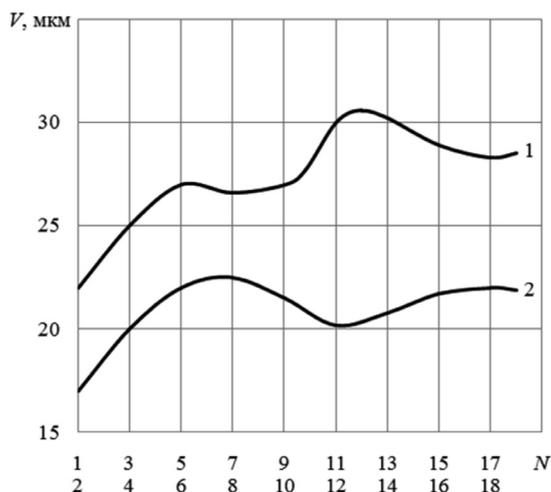


Рис. 10. Вертикальные перемещения реперных точек верхнего (1) и нижнего (2) образцов (рис. 9) при $P_c = 21,4$ кН

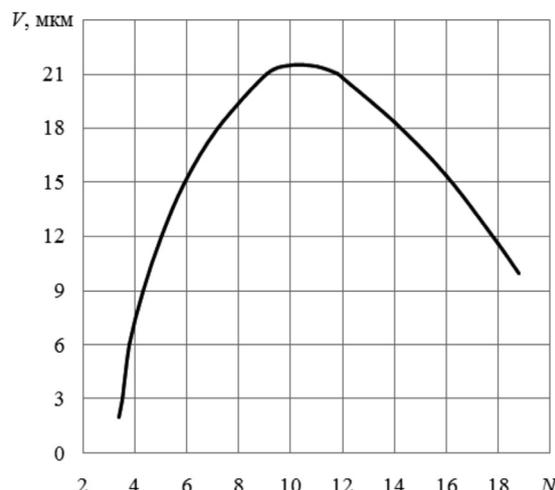


Рис. 11. Распределение вертикальных перемещений в модели из бронзы ОЦС 5-5-5, перфорированной круговыми отверстиями

Заключение

Для измерения величин сближения контактирующих деталей с покрытиями и оценки влияния перфорации контактирующих элементов на трансформацию упругой линии контакта, разработана методика регистрации перемещений и величин сближения любых точек, принадлежащих контактирующим телам, методом спекл-фотографии.

Результаты, полученные на моделях, позволяют определить величины сближений, вертикальные перемещения, деформации и напряжения в натурной конструкции в условиях контактного упругопластического взаимодействия шероховатых поверхностей деталей с учетом закономерностей подобия.

Полученный критерий подобия $E\delta / (HB\rho_{np})$ пластической зоны позволяет моделировать как геометрические характеристики поверхности R_a и ρ , так и ее физико-механические свойства E и HB .

Список литературы

1. Jones R., Wykes C. Holographic and Speckle Interferometry. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 368 p.
2. Гусев М.Е., Воронин А.А., Гуревич В.С., Исаев А.М., Алексеев И.В., Редкоречев В.И. Методы цифровой голографической интерферометрии и их применение для измерения наноперемещений // Наносистемы: физика, химия, математика. 2011. Т. 2. № 1. С. 23–39.
3. Борыняк Л.А. Оптические методы в механике твердого деформируемого тела // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 5. № 3. С. 7–10.
4. Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Bellingham: Society of Photo Optical, 2020. 468 p.
5. Волков И.В., Вышинский В.В., Кисловский А.О. Теоретические основы метода спекл-голографии в экспериментальной механике // Труды Московского физико-технического института. 2017. Т. 9. № 2 (34). С. 13–22.
6. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 176 с.
7. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 248 с.
8. Сердобинцев Ю.П., Бурлаченко О.В., Схиртладзе А.Г. Повышение качества функционирования технологического оборудования. Старый Оскол: ТНТ (Тонкие наукоемкие технологии), 2021. 412 с.