

СТАТИЧЕСКОЕ МИКРОСМЕЩЕНИЕ ОДНОГО ТЕЛА ПО ДРУГОМУ

И. Р. КОНЯХИН

(Представлено научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

В настоящей статье описываются различные по своему характеру виды предварительных смещений, происходящие перед троганием с места одного тела по другому. Характер этих смещений может быть различным в зависимости от тех условий, в которых находятся микровыступы шероховатых поверхностей, имеющиеся в местах соприкосновения двух тел. Статья написана по результатам опытов, которые проводились путем микродеформации шероховатой площадки при помощи другого тела, имеющего сравнительно гладкую рабочую поверхность.

Введение

В литературе, посвященной вопросу о предварительном смещении, имеются только некоторые весьма немногочисленные сведения о характере деформации материала контакта.

При детальном изучении предварительного смещения обнаруживается, что в формах микросдвига имеется некоторое разнообразие.

Предварительные смещения можно разделить на два вида: статические, проходящие независимо от времени, и кинетические, связанные с временем определенной зависимостью.

В настоящей работе рассматриваются только статические смещения, изученные при помощи экспериментов, которые проводились на приборе, являющемся некоторым усовершенствованием прибора А. В. Верховского [1].

Характерной особенностью микродеформации сдвига материала, находящегося в местах касания двух тел, является то, что микросдвиг не может быть произведен без давления одного тела на другое, так как сила тяги при смещении тела передается им другому телу через посредство статического трения.

Действие же нормальной нагрузки при сдвиге вызывает в контакте особое состояние, сущность которого состоит в следующем.

Микровыступы шероховатой поверхности, имеющие различную высоту, вступают в контакт не все сразу, а постепенно, один за другим по мере сближения тел во время увеличения нормальной нагрузки. Вследствие этого степень деформации сжатия у них различна, и поэтому каждый сжатый элемент контакта испытывает давление, отличное от

давлений на других выступах. Поэтому и сила статического трения на каждом элементе имеет свою величину. Кроме того, микровыступы, имея различные размеры, обладают разными жесткостями при деформировании их сдвигом. Ввиду указанных обстоятельств различные элементы контакта при сдвиге имеют различные степени деформаций, определяемые, с одной стороны, жесткостью, с другой — силой статического микро-трения. Чем больше жесткость, тем меньше деформация и наоборот, чем больше сила статического трения, тем позже наступает микроскольжение элементов контакта и тем больше их деформация сдвига.

Таким образом, величина сдвиговой деформации микровыступа пропорциональна силе статического трения и обратно пропорциональна жесткости данного элемента контакта.

$$C = \frac{F}{K},$$

где C — смещение элемента, F — сила трения, K — жесткость в кг/мм, C — величина перемещения вершины микровыступа относительно его основания до начала проскальзывания.

Естественно, что очень многие микровыступы имеют различную смещаемость C .

Элементы, обладающие большей величиной C при микросдвиге, имеют возможность к деформации большей величины, чем элементы с малым C . Первые из них можно назвать активными элементами, вторые — слабыми.

Во время смещения наиболее слабые элементы начинают проскальзывать в первую очередь, наиболее активные — в последнюю.

Смещение, которое происходит в первый раз после постановки образцов для опыта, сопровождается пластической деформацией элементов контакта, повторное — упругой, так как при первичном сдвиге микровыступы упрочняются пластической деформацией.

При повторном смещении между смещающей силой и величиной микросдвига наблюдается нелинейная зависимость, которая обусловлена тем, что микровыступы начинают скользить неодновременно.

Снятие сдвигающей силы сопровождается упругим возвратом верхнего образца по нижнему. В это время происходит упругое восстановление деформированных элементов. Во время указанного возврата более слабые элементы, восстановившись полностью, начинают деформироваться в обратную сторону, так как возврат продолжается за счет восстановления активных элементов. Наконец, сопротивление всех слабых элементов становится равным силе еще не восстановившихся, наступает равновесие сил, в это время сила тяги оказывается уменьшенной до нуля.

Таким образом, в результате смещения и возврата в контакте оказывается накопленной упругая энергия деформированных элементов — слабых и активных, сдвинутых в разные стороны.

При постепенном уменьшении теперь нормальной нагрузки слабые элементы, потеряв сцепление, начнут проскальзывать в сторону производившегося сдвига, и активные элементы, обладая достаточным сцеплением с верхним образцом, поведут его в сторону происходившего перед этим упругого возврата. Получается возврат второго рода. В это время контакт освобождается от упругой энергии деформированных элементов.

2. Виды статических смещений

Статическое смещение одного тела по другому осуществляется медленным увеличением сдвигающей силы, действующей на верхний

образец. При этом наращивание величины силы производится настолько медленно, что в материале контакта успевают протекать пластические деформации сдвига микровыступов. В процессе такого смещения прекращение роста силы тяги приводит к немедленной остановке образца. Если сила тяги будет увеличиваться быстрее, чем этого требует статическое смещение, то после прекращения ее наращивания тело не останавливается, а продолжает микродвижение с убывающей скоростью. Такое смещение уже не является статическим, как в предыдущем случае.

Статическое смещение, если оно производится в первый раз после постановок образцов и нагружения их нормальной силой, совершается пластически.

В процессе этого сдвига материал в местах соприкосновения тел упрочняется. В результате после снятия сдвигающей силы получается остаточное смещение.

Повторный микросдвиг происходит упруго, но из-за проскальзывания более слабых элементов контакта сдвиг получается похожим на пластический. Поскольку характер такого микросмещения определяется упругостью и микротрением элементов контакта, то его можно назвать упруго-фрикционным.

Опишем один из опытов смещения образца из закаленной стали по бронзовому. В этом случае пластическую деформацию сдвига испытывают только микровыступы шероховатой поверхности нижнего тела.

На рис. 1 показан график первичного смещения в виде кривой OA . Последняя представляет собой статическое смещение силой тяги P , возрастающей от нуля.

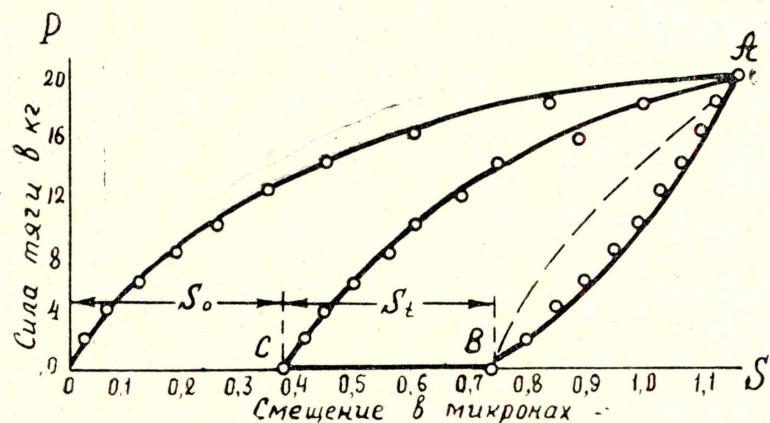


Рис. 1.

Другая кривая — AB отображает упругий возврат, происходивший во время снятия смещающей силы. Горизонтальная прямая BC соответствует второму возврату, имевшему место при постепенном снятии нормальной нагрузки. Величина CO показывает остаточную деформацию.

После этого опыта образцы снова были нагружены нормальным давлением. Затем путем наращивания от нуля силы тяги произведено повторное смещение, которое произошло согласно кривой CA (рис. 1). Эта кривая представляет собой упруго-фрикционное смещение, которое происходило на материале, упрочненном предыдущим смещением. Как показывает кривая CA , смещение происходило с более интенсивным сопротивлением, чем в предыдущем случае.

После смещения постепенное уменьшение до нуля силы тяги сопровождалось упругим возвратом верхнего образца. Возврат произошел согласно кривой AB графика, то есть так же, как и в предыдущем слу-

чае. После снятия сдвигающей силы получилось остаточное смещение $СВ$. При постепенном уменьшении затем нормального давления образец двигался противоположно начальному смещению, совершая второй упругий возврат согласно графику. Таким образом, цикл повторного смещения оказался замкнутым — фигура $СABC$. Площадь этой фигуры соответствует фрикционным потерям энергии в контакте.

Смещение согласно кривой $СА$ происходило после того, как была снята нормальная нагрузка и снова приложена. Эта операция устранила фрикционные связи элементов и дала возможность им освободиться от упругой энергии путем восстановления. Можно сказать, что в этом случае произошла разрядка контакта от упругой энергии, содержащейся в нем до этого благодаря фрикционным связям, обусловленным нормальным давлением. Если после смещения такой разрядки не сделать, то последующее смещение происходит не так, как это показывает кривая графика $СА$, а согласно более крутой линии $ВА$, показанной пунктиром и образующей с кривой упругого возврата AB петлю гистерезиса. Заметим, что петля гистерезиса также обусловлена фрикционными связями элементов контакта; при определенном способе смещения она отсутствует.

В результате описанного опыта получено три различных кривых статического смещения — кривые графика $ОА$, $СА$, $ВА$.

3. Остаточные силы контакта, обусловленные фрикционными связями

Как было описано ранее, после предварительного смещения и последующего упругого возврата при снятии сдвигающей силы в контакте будут иметь место остаточные силы, обусловленные торможением элементов контакта фрикционными связями при их стремлении к восстановлению. Величину такой упругой силы можно определить следующим способом.

Как мы уже видели ранее, во время постепенного уменьшения нормальной нагрузки образец движется назад под действием упругой силы рассматриваемых элементов. Если образцу не дать возможности совершить этого движения, то упругие элементы контакта, освобождаясь от фрикционных связей во время уменьшения давления, все же не будут иметь возможности к упругому восстановлению благодаря задержанию его подпирающей силой. Когда будет снята вся нормальная нагрузка при неподвижном образце, то подпирающая сила окажется равной остаточной силе контакта.

Описанные остаточные силы контакта заметным образом влияют на характер статического смещения. Покажем это на опыте с образцами — закаленная сталь по стали.

Сначала было проведено статическое смещение при нормальной нагрузке $N_c = 45$ кг при помощи тянущей силы, увеличиваемой от нуля до $P_c = 25$ кг. В результате была получена кривая графика 1 рис. 2. Затем проводилось такое же смещение, с той только разницей, что предварительно была проделана некоторая подготовка, заключающаяся в следующем.

Образцы, нагруженные нормальной силой $N_c = 20$ кг смещались силой тяги $P_c = 14$ кг, после чего, не снимая этой силы, нормальное давление увеличили до $N_c = 45$ кг. После снятия сдвигающей силы сделано смещение таким же образом, как и в предыдущем случае, силой $P_c = 25$ кг.

Кривые графиков обоих смещений показаны на рис. 2.

Кривая 2 на графике занимает более высокое положение, чем кривая 1. Следовательно, при втором смещении сопротивления сдвигу в соответственные моменты были больше, чем в первом случае.

Перед вторым микродвигом было сделано увеличение остаточных сил в контакте усилением нормальной нагрузки. Это и повлияло на характер смещения во втором опыте, несмотря на то, что смещения в обоих случаях проводились совершенно одинаково. Можно показать также случай, когда частичная разрядка контакта от остаточных сил снижает сопротивление его микродвигу.

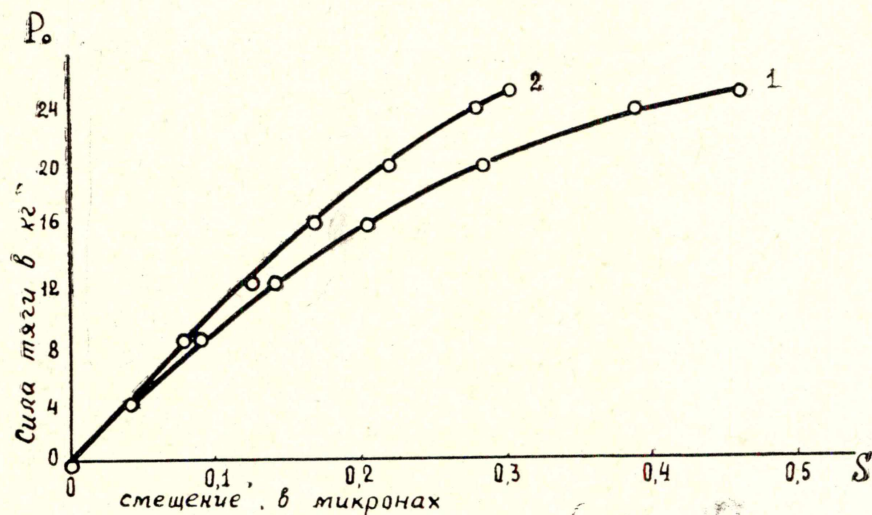


Рис. 2.

Опыт проводился на образцах: верхний из закаленной стали, нижний — из меди.

Сначала верхний образец смещался по нижнему силой $P_c = 13$ кг при нормальном давлении $N_c = 45$ кг. Вследствие этого в контакте

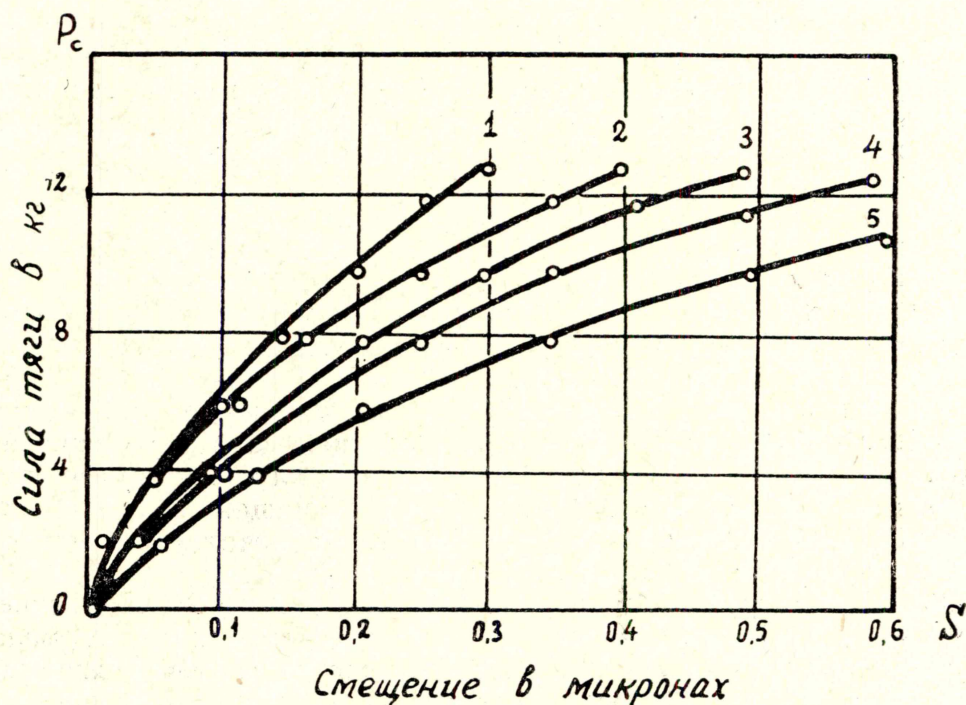


Рис. 3.

после снятия смещающего усилия имеются остаточные силы. После этого проводилось смещение образцов с уже имеющимися в контакте остаточными упругими силами. В результате получена кривая 1 рис. 3.

После снятия смещающей силы нормальная нагрузка была уменьшена до $N_c = 20$ кг и сразу же снова увеличена до прежней величины $= 45$ кг. Эта операция освободила некоторые элементы контакта от напряженного состояния, а именно те из них, у которых фрикционные связи были малы, и при уменьшении давления они, как слабо нажатые, проскользнули, вследствие чего упругая сила всего контакта уменьшилась.

Смещение после этого произошло по кривой 2, которая показывает, что сопротивление сдвигу уменьшилось.

Опыт далее был повторен еще два раза при снижении нормальной нагрузки до 10 кг и до 3 кг. После разрядки контакта указанными снижениями давления образцы смещались, как и ранее, теми же силами тяги в 13 кг при нормальных нагрузках 45 кг. В результате последних опытов получены кривые 3 и 4.

Графики рис. 3 показывают, что чем больше была разрядка контакта от остаточных сил, тем меньше получалось сопротивление смещению.

Сопротивление контакта статическому микросдвигу получается наименьшим, если предварительное смещение сделать в обратную сторону, не изменяя величины нормальной нагрузки. Однако в данном случае имеет значение: освобождались ли образцы от нормальной нагрузки перед их последующим смещением вперед или нет. Если освобождались, то смещение идет так же, как показывает кривая 4 графика рис. 3. Если же после предварительного смещения назад не сделать освобождения от нормального давления и производить смещение вперед, то оно происходит так, как это отображено кривой 5, занимающей на графике самое низкое положение.

Так как в последнем опыте (кривая 5) перед статическим смещением контакт не освобождался временно от нормальной нагрузки, то не было в нем разрядки и остаточные силы в нем имелись, но те из них, которые были обусловлены активными элементами, имели направление в сторону последующего смещения, а не противоположно, как это имело место в предыдущих опытах. Следовательно, остаточная сила в контакте в последнем случае помогала силе тяги в смещении, а не препятствовала ей, как это было в предыдущих случаях. Все сказанное относится к активным элементам контакта; слабые, имея малые фрикционные связи, подвержены проскальзыванию, и поэтому их влияние на смещение оказывается меньшим, ибо, начав проскальзывать, они уже не участвуют больше в дальнейшей упругой деформации, и поэтому их сопротивление во время дальнейшего микросдвига не возрастает, а остается постоянным, в то время как сила тяги все время возрастает.

Микросдвиг одного тела по другому можно сделать не только путем увеличения от нуля силы тяги, но также и снижением нормальной нагрузки при действии небольшого, постоянного по величине тянущего усилия. Будучи приложенной к смещаемому телу, она немного подает его вперед, после чего образец остается неподвижным. Последующее медленное уменьшение нормального давления вызывает микросмещение в сторону приложенной небольшой касательной силы. Смещение в данном случае продолжается до тех пор, пока не будет снята почти вся нормальная нагрузка.

Подобные опыты проведены были на материалах закаленная сталь по меди. К верхнему образцу прикладывалась сила тяги $P_c = 3,3$ кг при нормальном давлении $N_c = 45$ кг. Последняя затем плавно уменьшалась. В процессе этого верхнее тело перемещалось в направлении усилия $P_c = 3,3$ кг.

Аналогичный опыт был проведен при смещающем усилии в 6,6 кг. Во втором случае перемещение образца было более интенсивным.

Графики обоих опытов показаны на рис. 4.

Увеличение силы тяги во время смещения способствует преодолению сопротивления микросдвигу элементов контакта. Во время проскальзывания их сопротивление благодаря трению остается постоянным, а переменность силы тяги обусловлена упругим сопротивлением оставшихся, не проскальзывающих элементов. При смещении путем уменьшения нормального давления слабые элементы, освобождаясь от фрикционных связей, не участвуют больше в деформации сдвига и поэтому не оказывают не только упругого сопротивления их деформированию, но не оказывают также и фрикционного сопротивления. Поэтому в данном случае микросдвиг идет по-иному, чем при смещении путем увеличения смещающей силы.

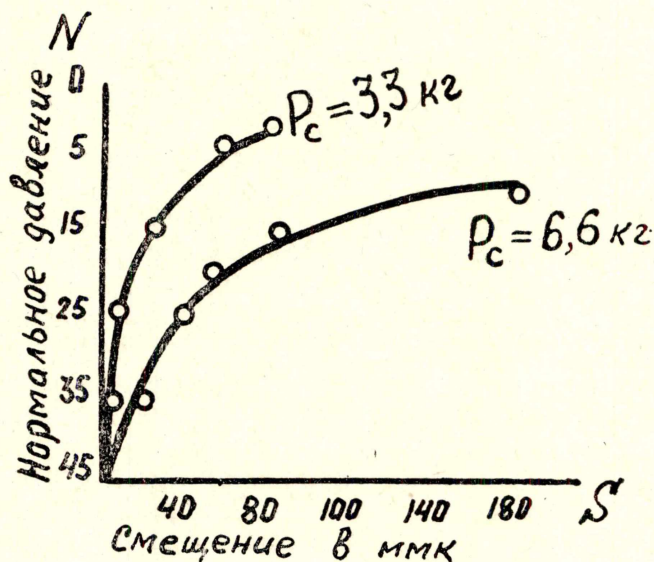


Рис. 4.

Последнее положение подтверждается еще следующим. Кривые статических смещений, полученные от опытов со сдвигом нарастающей силой тяги при постоянной нормальной нагрузке, по своей форме близки к параболам вторых степеней, а кривые, полученные от смещения при помощи уменьшения нормального давления при постоянном значении силы тяги, по своей форме близки к параболам четвертых степеней.

Все приведенные статические кривые предварительных смещений, полученные различными способами, свидетельствуют о некотором их разнообразии, а также о том еще, что энергетические потери в контакте в значительной степени обусловлены микротрением и пластической деформацией микровыступов шероховатой поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела, т. 4, Томск, 1947.