

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

НОВОЧЕРКАССКИЙ
ордена Трудового Красного Знамени
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени Серго Орджоникидзе

На правах рукописи

Аспирант Д. Т. АВДЕЕВ

Исследование предварительного
смещения при относительном сдвиге
тяжело нагруженных стальных деталей

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

К У Д А _____

К О М У _____

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертационной работы аспиранта Новочеркасского политехнического института Авдеева Дина Тихоновича на тему «Исследование предварительного смещения при относительном сдвиге тяжело нагруженных стальных деталей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится 4 марта 1963 года на заседании межвузовского (объединенного) Совета по машиностроительным специальностям при Новочеркасском политехническом институте.

Просим принять участие в работе Совета или прислать отзыв по автореферату.

И. о. ученого секретаря Совета института

Н. П. КСЮНИН.

Широкое применение в народном хозяйстве различных устройств и приспособлений, работа которых основана на трении покоя, обуславливает важность исследований, проводимых в этой отрасли науки о трении. Несмотря на это, трение покоя изучено сравнительно мало.

Наиболее интересным явлением трения покоя для пар трения, находившихся в длительном контакте, является предварительное смещение.

Предварительным смещением называют деформацию связи двух контактирующих тел до начала их относительного скольжения. Это явление изучалось многими исследователями, но при небольших давлениях на поверхностях контакта.

В современном же машиностроении встречаются узлы машин, в которых давления между контактирующими деталями доходят до $3000 - 5000 \text{ кг/см}^2$.

К таким узлам относятся прессовые соединения, работа которых основана на трении покоя.

Обзор специальной литературы показывает, с одной стороны, что изучение предварительного смещения в ряде случаев привело к ценным практическим результатам, однако предварительное смещение на тяжело нагруженном контакте не исследовалось; с другой же стороны, прочность прессовых соединений исследована очень мало именно вследствие малой изученности вопросов трения покоя на тяжело нагруженном контакте стальных деталей. Так, например, до сих пор не решен важный вопрос о способе контроля прочности прессовых соединений, позволяющем учитывать запас прочности соединения.

На основании изложенных выше положений была поставлена определенная задача, суть которой сводится к следующему: применяя современные методы измерения малых перемещений, всесторонне исследовать предварительное смещение на контакте тяжело нагруженных стальных деталей, используя в качестве образцов прессовые соединения. Результаты экспериментов обработать таким образом, чтобы выявить за-

зависимость неполного предварительного смещения от полной сдвигающей силы, или от усилия выпрессовки, с тем, чтобы эту зависимость можно было использовать для контроля прессовых соединений, а также для определения сдвигающей силы в других тяжело нагруженных фрикционных стыках.

План решения этой задачи выглядел следующим образом.

1. Разработать теоретические предпосылки, позволяющие конкретизировать цели и методику эксперимента.

2. Сконструировать экспериментальную установку и образцы для исследования.

3. Исследовать точность и надежность применяемой аппаратуры.

4. Провести эксперименты.

5. Обработать полученные данные.

6. Сделать выводы и разработать способ контроля прессовых соединений и принципиальную схему прибора для этого.

В качестве исходного положения для математического обоснования явления предварительного смещения было принято понятие об упруговязком характере связи двух твердых контактирующих тел.

Деформация такой связи в первом приближении может быть описана уравнением А. Ю. Ишлинского

$$\dot{T} + rT = b\dot{\varepsilon} + bn\varepsilon, \quad (1)$$

выражающим свойства упруго-вязкого тела. В этом уравнении

$\dot{T} = \frac{dT}{dt}$ — скорость изменения сдвигающей силы;

T — сдвигающая сила;

$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ — скорость деформации;

ε — деформация (предварительное смещение);

r, n, b — константы, характеризующие релаксацию, последействие и жесткость связи.

Если скорость изменения сдвигающей силы постоянная, т. е.

$\frac{dT}{dt} = v = \text{Const}$, то решение уравнения Ишлинского будет

$$\varepsilon = \frac{rv}{bn}t + \frac{v}{bn} \left(1 - \frac{r}{n} \right) \left(1 - e^{-nt} \right), \quad (2)$$

Здесь t — время действия сдвигающей силы.

Более точно описывает предварительное смещение на контакте трения формула В. С. Щедрова, которая для пары сталь-сталь и $t = \infty$ имеет вид:

$$\varepsilon = T_0 \left(\frac{2}{G} + \alpha \right). \quad (3)$$

Здесь G — модуль упругости при сдвиге, α — предельная деформация как функция нормального давления.

Эта простая и удобная формула может быть применена для вычисления предварительного смещения на контакте тяжело нагруженных стальных деталей после экспериментального определения α для высоких давлений.

В соответствии с теоретическими предпосылками, в программу опытов были включены серии экспериментов, позволяющих определить численные величины констант b, n, r и α .

Установка для исследования предварительного смещения на тяжело нагруженном контакте стальных деталей состояла из следующих узлов:

а) рычажного пресса;

б) специальной тензометрической муфты;

в) системы нагружения и разгружения;

г) электронного усилителя с блоком питания;

д) шлейфового осциллографа.

Установка удовлетворяла следующим условиям:

1. Нагружение прессового соединения осуществлялось сдвигающей силой в осевом направлении.

2. Скорость нагружения была постоянной для каждого данного опыта.

3. Нагрузка была строго центральной.

4. Деформации деталей в месте установки тензометрической муфты были сведены к минимуму и не отражались на результатах опытов.

5. Как предварительное смещение, так и сдвигающая сила записывались на пленку осциллографа на протяжении всего опыта, включая и момент разрушения соединения, с привязкой к времени.

6. Точность измерения предварительного смещения была не менее 0,1 мк, что составляло приблизительно 1% от максимального предварительного смещения.

7. Точность измерения сдвигающей силы была не менее 10 кг, что составляет от 5 до 0,3%.

Исследованию подвергались образцы прессовых соединений с номинальным диаметром посадки 21 мм, наружным диаметром втулки 50 мм и длиной посадки 13 мм, со сплошным валиком. Материалом деталей соединения была сталь 45 с твердостью по Бринелю $H_B = 207$.

Посадочные поверхности втулок и валиков шлифовались по 7 классу чистоты, $H_{ск} = 0,8 \div 1,6$ мк. Перед запрессовкой посадочные диаметры втулок и валиков измерялись соответственно на горизонтальном и вертикальном оптиметрах с ценой деления 0,001 мм в трех сечениях в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

По полученным шести отклонениям определялось среднее отклонение диаметра и по этим средним отклонениям валики и втулки подбирались в пары с различными натягами от 3 до 109 мк.

Сопрягаемые поверхности валиков и втулок обезжиривались авиационным бензином. Запрессовка производилась с небольшой (около 3 мм/мин) скоростью на винтовом прессе с помощью специального приспособления, исключающего перекосы. Всего исследовалось 40 соединений.

При опыте исследуемое соединение втулкой опиралось на отшлифованный кольцевой выступ площадки пресса.

Сверху на втулку своим основанием устанавливалась специальная тензометрическая муфта, состоящая из трех балочек равного сопротивления изгибу, укрепленных на основании и имеющих на себе по два проволочных датчика сопротивления, наклеенных с противоположных сторон. Нажимная шайба, укрепленная на валике соединения, через особые шарики при нагружении соединения давила на концы балочек, вызывая их изгиб и соответствующую деформацию датчиков. Это, в свою очередь, вызывало разбаланс электрической мостовой схемы, в которую включались датчики. Электрический импульс усиливался электронным усилителем ТУ-4М и подавался на шлейф осциллографа типа МПО-2, с помощью которого производилась запись на пленку. Величина сдвигающей силы измерялась с помощью проволочного датчика сопротивления, наклеенного на одну из подвижных колонн пресса.

Перед опытами было произведено исследование тензометрической муфты и всей электронной схемы с целью выявления характеристики муфты и возможных погрешностей. Было установлено следующее:

1) характеристика тензометрической муфты является линейной;

2) суммарная деформация деталей муфты не влияет на точность измерений, так как составляет менее 1%;

3) небольшие перекосы нажимной шайбы, возможные при установке муфты, не влияют на точность измерений;

4) влияние одного канала усилителя на другой практически отсутствует при режимах опытов;

5) дрейф нуля прекращался по истечении трех часов после включения муфты и усилителя, поэтому их включение в сеть производилось за три часа до начала опытов;

6) с целью устранения возможных помех питание ламп усилителя необходимо было производить постоянным током от аккумулятора большой емкости, что и осуществлялось при опытах;

7) чувствительность муфты составила около 0,15 миллиампера на 1 микрон.

Перед каждым экспериментом проводилась тарировка муфты и измерительной схемы. Если соединение не доводилось до распрессовки, то такая же тарировка проводилась и после опыта.

Тарировка проводилась на специально сконструированном приспособлении с помощью вертикального оптиметра. После установки муфты на соединение производилась балансировка усилителя до получения масштабного импульса, тождественного полученному при тарировке.

Все опыты по целевым установкам делились на семь серий.

Первые две серии опытов позволили установить как характер роста предварительного смещения при постоянной нагрузке, так и характер необратимого, или остаточного, предварительного смещения, а также позволили подтвердить предположение об упруго-вязком характере контакта тяжело нагруженных стальных деталей. В третьей серии опытов ставилась задача исследовать сам момент распрессовки, или момент разрушения прессового соединения. На пленку осциллографа записывалось увеличение предварительного смещения вплоть до разрушения соединения. Скорость пленки последовательно возрастала от 10 до 500 мм/сек. В момент распрессовки линия предварительного смещения была направлена вертикально, что позволило сделать вывод о практически мгновенном разрушении прессового соединения.

На рис. 1 показана одна из осциллограмм момента разрушения прессового соединения.



Рис. 1.

В четвертой серии опытов исследовалось предварительное смещение прессовых соединений при нагружении сдвигающей силой, увеличивающейся с постоянной скоростью вплоть до разрушения соединения, т. е. до начала скольжения. Скорость нагружения отдельных образцов находилась в пределах $55 \div 70$ кг/сек.

После обработки осциллограмм были построены графики предварительного смещения, как функции сдвигающей силы; некоторые из них приведены на рис. 2. Было установлено, что наиболее интенсивно предварительное смещение растет в моменты, непосредственно предшествующие распрессовке. В начальной же стадии нагружения изменение предварительного смещения почти пропорционально прилагаемой сдвигающей силе. Результаты этих опытов были подвергнуты математической обработке с целью определения констант n , b и r .

При математической обработке в качестве аппроксимирующей функции принималось уравнение (2), преобразованное в виде

$$\varepsilon = at + c(1 + e^{kt}), \quad (4)$$

Постоянные a , c и k определялись из графиков, построенных по результатам опытов, с помощью графоаналитического метода, затем вычислялись значения констант b , r и n .

Графики этих констант, отнесенных к усилию выпрессовки, представлены на рис. 3.

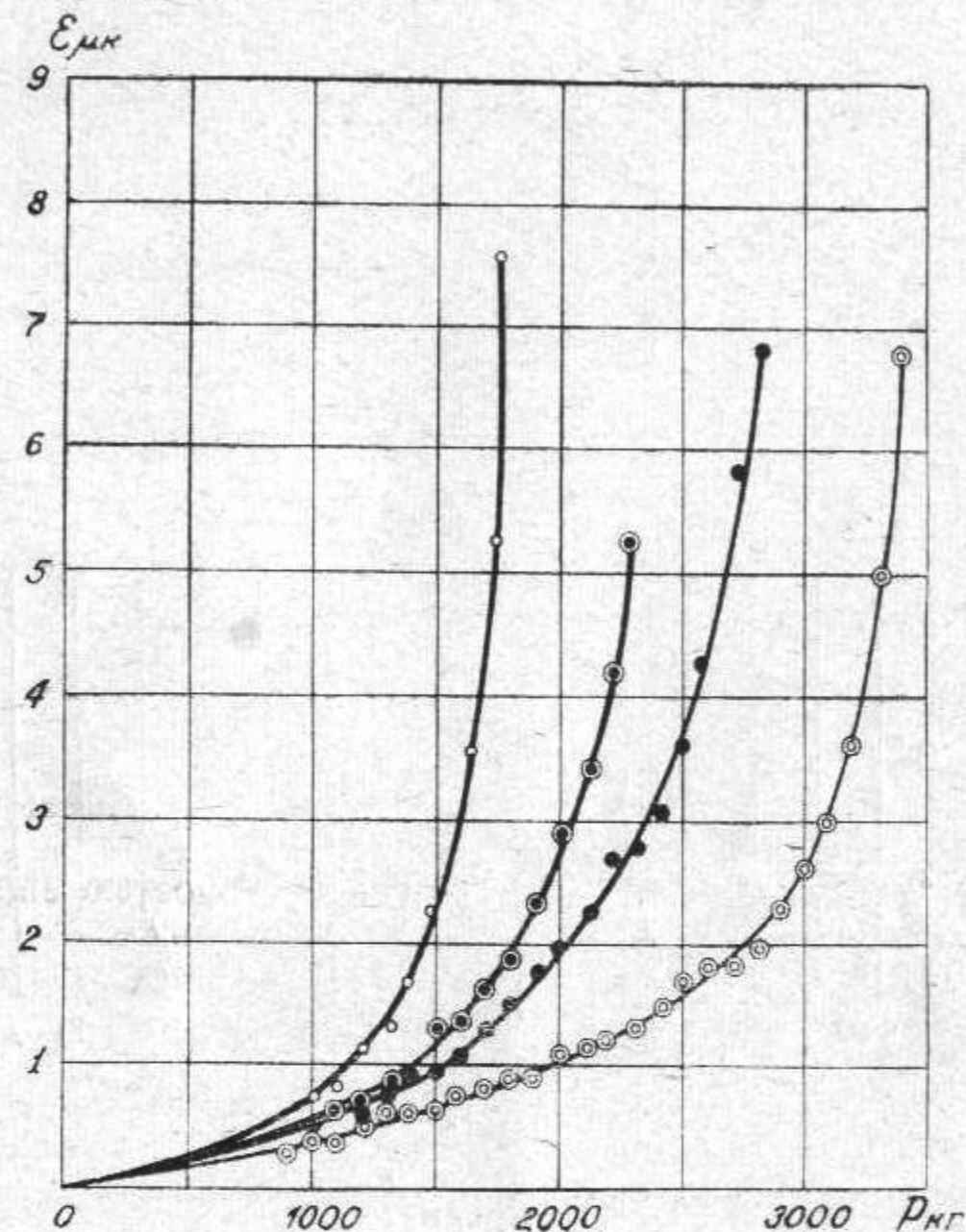


Рис. 2.

Особо важным является тот факт, что коэффициенты n и r по величине незначительно отличаются друг от друга. Приняв в первом приближении $n \approx r$ и имея из формул (2) и (4)

$$a = \frac{vr}{bn}, \quad (5)$$

получим:

$$b = \frac{v}{a}, \quad (6)$$

В формуле (4) правая часть состоит из двух членов, первый из которых представляет уравнение прямой, а второй — урав-

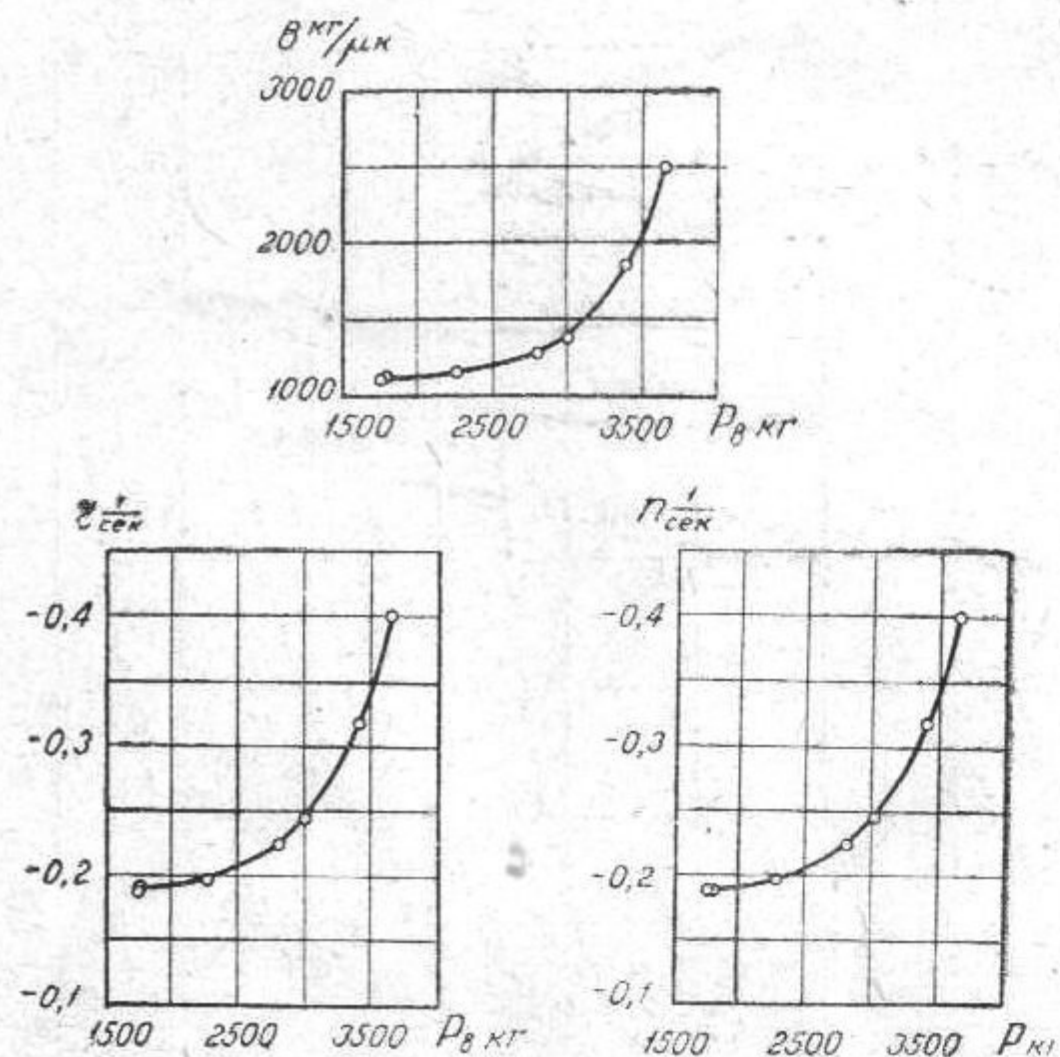


Рис. 3.

нение кривой. Кривые предварительного смещения также состоят из двух частей — прямой в начальной части и кривой — в конечной (рис. 2). Поэтому величину a можно определить из экспериментальных данных, причем

$$a = \frac{\varepsilon_i}{t_i}, \quad (7)$$

где ε_i — предварительное смещение в момент времени t_i на прямолинейном участке кривой. Учитывая, что при

$$v = \text{Const} \quad T_i = vt_i$$

получим из (6) и (7)

$$b = \frac{T_i}{\varepsilon_i}. \quad (8)$$

Таким образом, имея график изменения предварительного смещения во времени, построенный для прессового соединения, которое до распрессовки не доводилось, можно, выбрав соответствующее значение ε_i и зная при этом T_i , определить по формуле (8) коэффициент b , характеризующий жесткость связи.

Зная величину коэффициента b и имея график $b = f(P_b)$ (рис. 3), не составит большого труда определить усилие вы-прессовки указанного соединения.

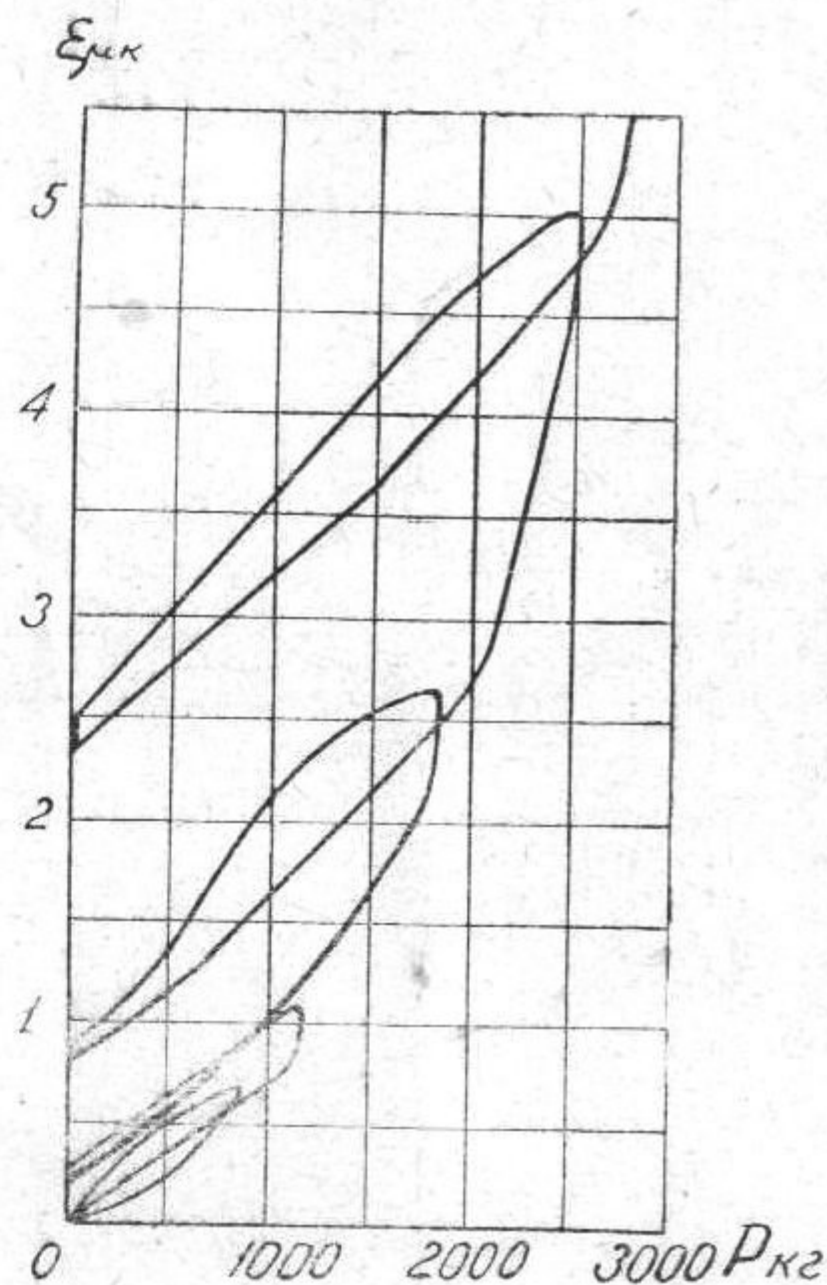


Рис. 4.

В опытах пятой серии исследовалось предварительное смещение при ступенчатом нагружении образцов прессовых

соединений, причем на каждой ступени производилась минутная выдержка как при нагружении, так и при разгрузке. На рис. 4 приведен график, построенный после обработки осциллограммы одного опыта, из которого легко заметить, что при повторном нагружении зависимость между сдвигающей силой и предварительным смещением можно с большой степенью точности считать линейной. Эта зависимость сохра-

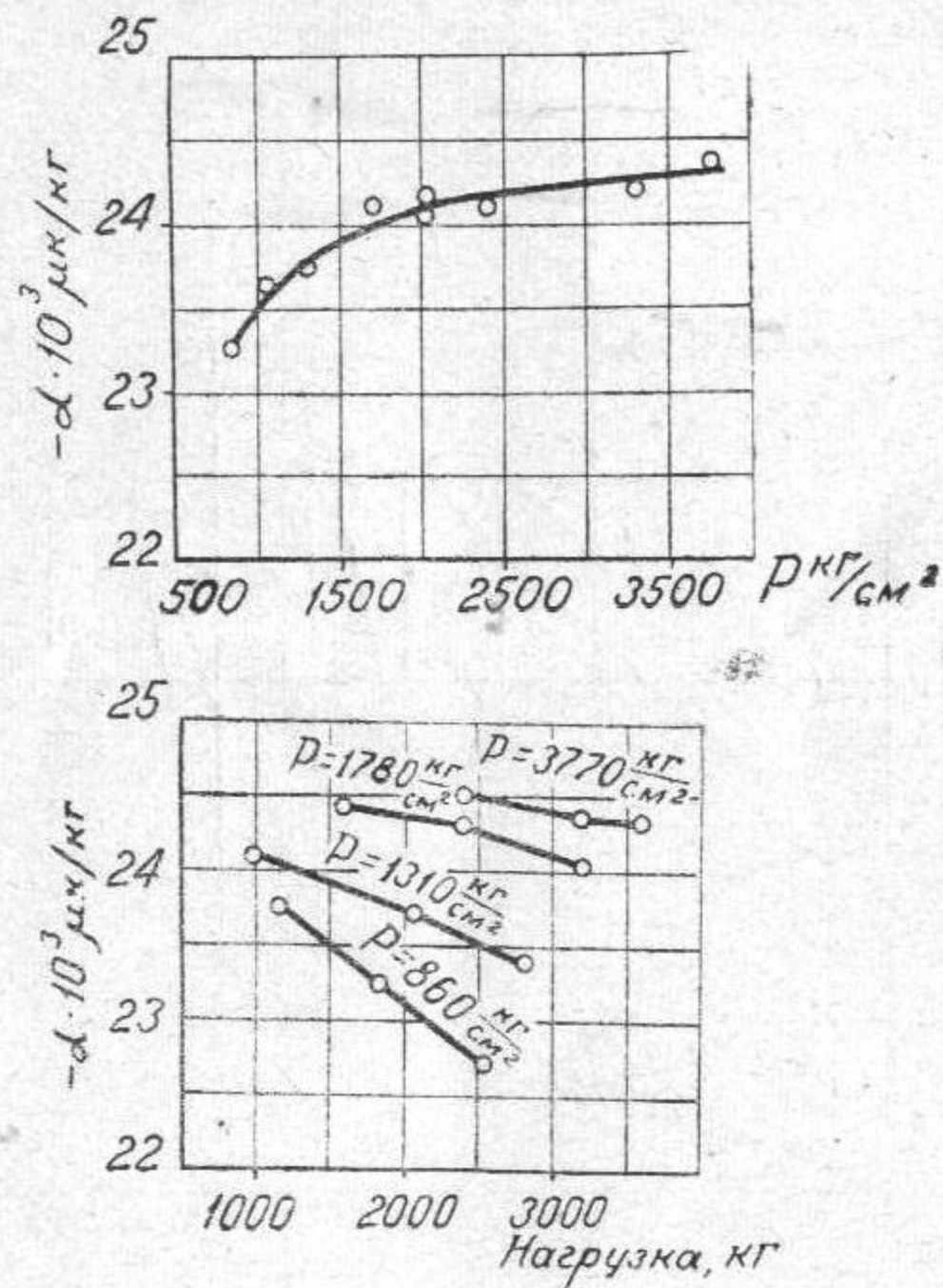


Рис. 5.

няется до тех пор, пока предварительное смещение не достигнет величины, наибольшей при предыдущем нагружении. Ве-

личина сдвигающей силы при этом, как правило, больше. Это явление можно объяснить упрочением стали на элементарных площадках контакта при сдвиге.

Целью опытов шестой серии являлось получение количественных данных для определения константы α в формуле (3). Нагружение осуществлялось последовательным увеличением нагрузки ступенями, с выдержкой на каждой ступени 30 сек. На рис. 5 приведен график изменения α в зависимости от давления на контактирующих поверхностях, причем каждое значение α определялось как среднее арифметическое из двух — трех значений при разных нагрузках. Из этого графика видно, что интенсивность изменения α при больших

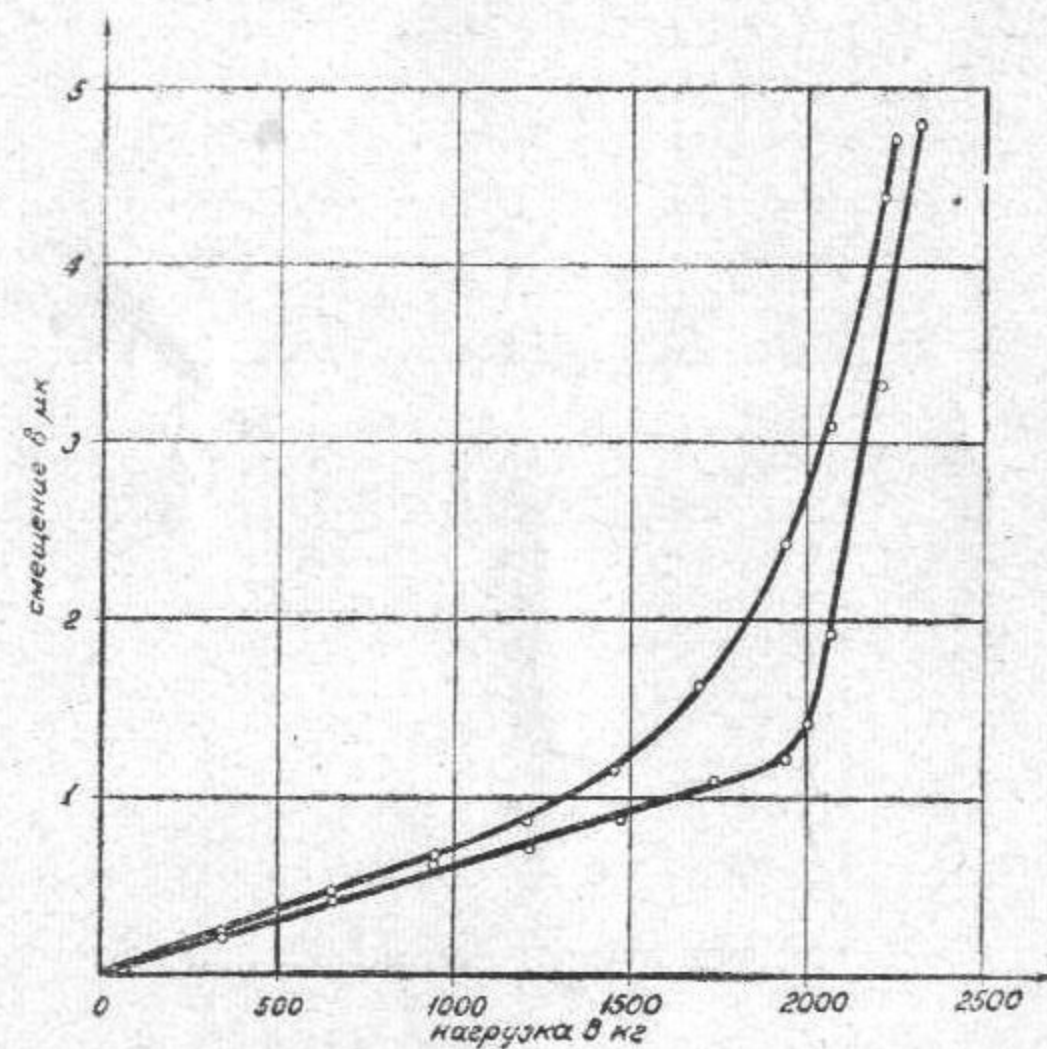


Рис. 6.

давлениях на контакте невелика. Там же приведены графики изменения α в зависимости от сдвигающей силы для нескольких образцов с различными удельными давлениями. Можно

заметить, что α несколько увеличивается с увеличением нагрузки, причем для образцов с меньшим давлением это увеличение происходит интенсивнее. Это явление можно объяснить ростом фактической площади контакта с увеличением сдвигающей нагрузки, что влечет за собой уменьшение давления на фактической площади контакта.

В седьмой серии опытов исследовалось наличие эффекта Верховского, заключающегося во влиянии начальных условий формирования контакта на величину и характер предварительного смещения при высоких давлениях на контакте. На рис. 6 приведены два графика, построенные после обработки осциллограмм двух опытов. Одна кривая, у которой ясно заметен перегиб, показывает изменение предварительного смещения в случае совпадения направлений усилия запрессовки и сдвигающей силы. Вторая кривая с менее заметным перегибом показывает изменение предварительного смещения в том случае, когда сдвигающая сила направлена в сторону, противоположную усилию запрессовки. Полученные результаты свидетельствуют о наличии эффекта Верховского даже при таких высоких давлениях, которые имели место в описываемых опытах.

Выводы и предложения

1. Трение покоя для пары сталь—сталь при высоких удельных давлениях на контакте ($850 \div 3400 \text{ кг/см}^2$) имеет упруго-вязкий характер, что подтверждается наличием как роста предварительного смещения при постоянной нагрузке, так и наличием упругих и остаточных деформаций.

2. При повторном нагружении прессового соединения предварительное смещение прямо пропорционально сдвигающей силе, пока оно не достигнет величины, наибольшей при предыдущем нагружении.

3. Разрушение прессового соединения происходит в очень малый отрезок времени (менее чем в $0,001 \text{ сек}$), то есть практически мгновенно.

4. Процесс предварительного смещения при распрессовке прессовых соединений нагрузкой, увеличивающейся с постоянной скоростью, достаточно точно может быть описан уравнением Ишлинского для упруго-вязкого тела.

5. Установлена определенная связь между константами уравнения Ишлинского и полным сдвигающим усилием.

6. Доказано, что посредством измерения неполного предварительного смещения может быть осуществлен контроль прочности прессовых соединений, а также может быть опре-

делено полное сдвигающее усилие на тяжело нагруженном контакте любых стальных деталей.

7. Определены значения константы α для пары сталь—сталь при больших давлениях, что дает возможность применять формулу проф. В. С. Щедрова для определения предварительного смещения при постоянной сдвигающей силе на тяжело нагруженном контакте стальных деталей.

8. Установлено, что при больших давлениях на контакте и медленном приложении сдвигающей силы коэффициент трения покоя с изменением давления будет оставаться приблизительно постоянным.

9. Установлено, что коэффициент α несколько увеличивается с увеличением сдвигающей нагрузки и что это увеличение тем меньше, чем выше давление на контакте.

Предложения по практическому применению вывода о возможности контроля прочности прессовых соединений

Предлагается осуществлять контроль прочности прессовых соединений путем измерения величины неполного предварительного смещения. Предварительно путем экспериментов должна быть определена зависимость жесткости связи от усилия выпрессовки.

Вычислив жесткость связи с помощью неполного предварительного смещения и сдвигающей силы, ему соответствующей, можно определить полную сдвигающую силу, или прочность прессового соединения.

Конструкция прибора для контроля прочности прессовых соединений указанным способом будет в значительной степени определяться размерами и конструкцией деталей прессового соединения. Схема прибора целиком будет зависеть от характера сдвигающей силы, принимаемой за критическую.

Наиболее пригодными для практики следует признать электрические методы измерения предварительного смещения. Метод, предложенный автором и основанный на применении проволочных датчиков сопротивления, может быть рекомендован и в практике при небольших скоростях нагружения.

Для динамических нагрузок наиболее эффективным, по-видимому, окажется емкостный датчик предварительного смещения, обладающий малой инерционностью. Датчик этого типа автор применял в предварительных опытах и получил хорошие результаты.

Опубликованная литература по теме диссертации

1. Авдеев Д. Т. Муфта с датчиками сопротивления для измерения малых перемещений, труды НПИ, т. 127, 1962.
 2. Авдеев Д. Т. Об оценке статической прочности прессовых соединений, труды НПИ, т. 127, 1962.
 3. Авдеев Д. Т. Исследование предварительного смещения прессовых соединений, Известия ВУЗов, Машинстроение, № 4, 1962.
 4. Авдеев Д. Т. О предварительном смещении на тяжело нагруженном контакте, труды НПИ, т. 131, 1962.
-

Сдано в производство 8. 1. 63 г.

Подписано к печати 19. 1. 63 г.

ПК 15051 Объем 1 печ. лист

г. Новочеркасск. Типография НПИ

Заказ № 23. Тираж 175.