



Научная статья / Original Article

УДК 621.791.14, 621.01:531.3(05)

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188104>

EDN: <https://www.elibrary.ru/NYZVBY>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ИНЕРЦИОННОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ НА ДЕФОРМАЦИЮ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Л.Н. Рабинский¹ , Т.Т. Фозиллов^{1,2,3} 

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет «СТАНКИН»,

³Филиал Акционерного общества «Объединенная двигателестроительная корпорация»

«Научно-исследовательский институт организации и производства двигателей»,

г. Москва, Россия

✉ fozbourne@yandex.ru

Цитирование: Рабинский Л.Н., Фозиллов Т.Т. Исследование влияния коэффициента трения при инерционной сварке трением на деформацию деталей газотурбинных двигателей // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188104>

Аннотация. В работе представлен результат обзора аналитических способов определения неизвестного коэффициента трения новых суперсплавов на основе никеля. В ходе исследования выполнен теоретический расчет тепловых потоков, суммарного момента инерции и суммарного крутящего момента. С целью определения влияния коэффициента трения на качество сварного соединения и осадку также были рассмотрены модели в среде Ansys. Расчёту были подвержены жаропрочные сплавы на основе никеля, сваренные на отечественной установке инерционной сварки трением ПСТИ-400. Изменение коэффициента трения в процессе сварки происходит по двум направлениям. Первое направление задано от оси вращения в сторону внешнего диаметра кольца, на этой кромке

коэффициент трения наиболее высок, происходит это в виду того, что внешний контур образца охлаждается внешним воздействием и максимально удален от источника возникновения тепла и на металл действуют растягивающие напряжения, ситуация обратная на кромке внутреннего диаметра. При построении графика зависимость будет иметь параболический вид. Второе направление рассматривается в точке контакта, а именно на трех стадиях самой сварки, в начальной стадии до 100-200°C коэффициент трения незначительно снижается (микрошероховатости сглаживаются), на второй стадии он резко возрастает (в 2-10 раз) в виду образования точек сцепления и их разрывов. В пластифицированном состоянии на третьей стадии при проковке коэффициент трения возрастает снова, но незначительно и неинтенсивно, а затем идет снижение, происходит это в виду удаления окислов их их лома из сварного стыка. Оценивая напряженно-деформационное воздействие итогом служит расчёт термодинамических процессов (тепловой поток и его направление). В случае сварки трением, как таковой тепловыделение напрямую связывается с энергией деформации свариваемого металла (согласно принятой норме, что вся механическая энергия переходит в тепловую).

Ключевые слова: коэффициент трения; момент инерции; инерционная сварка трением; термодиформационное воздействие сварки.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE FRICTION COEFFICIENT IN INERTIAL FRICTION WELDING ON THE DEFORMATION OF GAS TURBINE ENGINE PARTS

L.N. Rabinskiy¹ , T.T. Fozilov^{1,2,3}  

¹Moscow Aviation Institute (National Research University),

²Moscow State University of Technology "STANKIN",

³Branch of Joint Stock Company "United Engine Corporation" "Research Institute of Organization and Production of Engines",

Moscow, Russia

 fozbourne@yandex.ru

Abstract. This paper presents the results of a review of analytical methods for determining the unknown friction coefficient of new nickel-based superalloys. The study included theoretical calculations of heat fluxes, the total moment of inertia, and the total torque. Ansys models were also used to determine the influence of the friction coefficient on weld joint quality and upsetting. The calculations were performed on heat-resistant nickel-based alloys welded on a domestically produced PSTI-400 friction inertia welding machine. The friction coefficient changes in two directions during welding. The first direction is set from the axis of rotation toward the outer diameter of the ring. At this edge, the friction coefficient is highest. This occurs because the outer contour of the specimen is cooled by external influences and is as far removed from the heat source as possible, subjecting the metal to tensile stresses. The situation is reversed at the edge of the inner diameter. When plotted, the dependence will have a parabolic shape. The second direction is considered at the point of contact, specifically at three stages of welding itself. In the initial stage, up to 100-200°C, the friction coefficient decreases slightly, as microroughness is smoothed out, thereby reducing the coefficient. In the second stage, it increases sharply (by 2-10 times) due to the formation of adhesion points and their rupture. In the plasticized state, during the third stage of forging, the friction coefficient increases again, but slightly and not intensely, and then decreases, due to the removal of oxides and their debris from the weld joint.

Keywords: friction coefficient; moment of inertia; inertial friction welding; thermal deformation effect of welding.

Введение

В настоящее время все чаще выполняют детали авиационных двигателей из жаропрочных деформируемых, в том числе и гранулируемых, суперсплавов на основе никеля. Они обладают спектром крайне высоких механических и циклических свойств, однако имеют ряд недостатков относительно технологических характеристик. Помимо высоких значений твердости и затруднительной механической обработки они также считаются

несвариваемыми традиционными методами с применением плавления. Происходит это в виду обильного содержания интерметаллидных упрочняющих включений (>50%) и детали становятся склонны к красноломкости даже несмотря на то, что полуфабрикаты из этих сплавов произведены с применением плавления [1].

Однако болтовое соединение таких деталей и узлов отягощает конструкцию и создает огромное количество концентраторов напряжений, таким образом обоснован выбор ротационной сварки трением [2]. Помимо того, что сам процесс сварки трением происходит в твердой фазе, без плавления, она также экологична и в отличие от, например, электронно-лучевой сварки, более производительна (3 сварки деталей диаметром свыше 400 мм в час).

С точки зрения технологического процесса ротационная (инерционная) сварка трением процесс изучен нами в достаточной мере, однако рассматривая его более фундаментальной позиции (сопротивление материалов, математическое моделирование) существует ряд задач, которые необходимо решить для уточнения модели и возможности внедрения полученных результатов в цифровой двойник изделия, а также расширить информационную базу об имеющихся новых материалах.

Для определения углов приложения и сил деформационного воздействия в первую очередь нужно рассмотреть такой процесс, как осадка коническими бойками. При таком процессе направление сжимающих сил P , будучи ортогональным к поверхности инструмента, составляет с направлением вертикальной оси определенный угол, а потому проекция на горизонтальную ось силы направлена равнообратно относительно направления проекции силы на эту ось (рисунок 1).

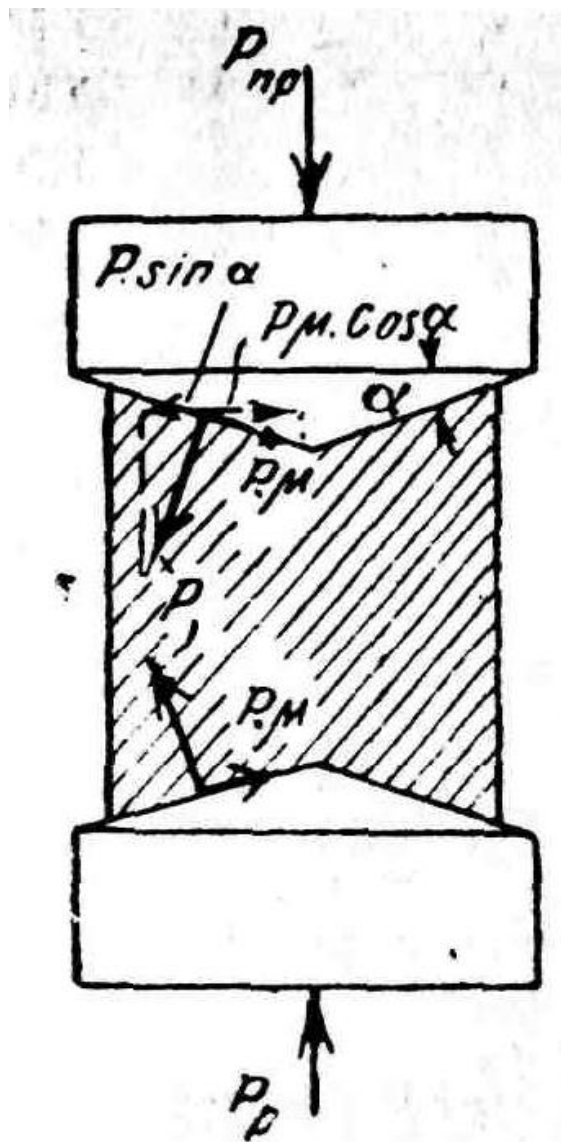


Рисунок 1 - Схема действующих внешних сил при осадке металла коническими бойками [1]

Трение вызывает неравномерность деформации. При осадке коническими бойками образцов с коническими выточками удавалось получить вполне равномерную деформацию. Для получения равномерной деформации угол наклона конуса должен соответствовать величине коэффициента трения между инструментом и металлом. Равномерная деформация может быть получена только в том случае, если проекция силы давления на ось, перпендикулярную к направлению приложенной силы, и проекция силы трения на ту же ось будут равны, то есть $P \sin \alpha = P \mu \cos \alpha$. В таком случае $\mu = \tan \alpha$.

Как и в представленном примере случая осаждаемых поверхностей аналогия прослеживается и в ротационной сварке трением.

Каждый параметр ротационной (инерционной) сварки трением так или иначе влияет на осадку и качество сварного соединения. Момент инерции,

удельная энергия, давление, окружная скорость, скорость вращения, усилие, наличие притирки определяют в совокупности глубину провара и протяженность зон термомеханического воздействия, однако есть параметры, которые не учитываются в установках типа ПСТИ-400. Одним из таких параметров является коэффициент трения (μ) материала.

Под влиянием сил трения в ряде случаев усилие деформации возрастает в несколько раз по сравнению с тем усилием, которое обусловлено истинным сопротивлением металла деформации. Чем больше трение, тем большее усилие нужно для деформации и тем больше расход энергии на деформацию. Кроме того, при действии сил трения металл деформируется неравномерно, что приводит к разнородности его структуры, возникновению растягивающих напряжений в металле, которые иногда приводят к нарушению сплошности изделия.

Различают следующие виды трения, но нас интересуют лишь некоторые:

- 1) **чистое** – на поверхности трения нет ни окислов, ни смазки; механизм чистого трения может наблюдаться только в условиях физического опыта и при обработке в вакууме;
- 2) **сухое** – на поверхности трения имеются пленки окислов и загрязнения, но нет искусственной смазки.

Коэффициент трения в ротационной (инерционной) сварке трением зависит от многих технологических факторов процесса пластической деформации, таких как состояние поверхности свариваемых кромок, температура и скорость деформации, химический состав деформируемого металла, наличие смазки и др. согласно литературным источникам.

При обработке давлением с нагревом химический состав деформируемого материала определяет состав и физические свойства окалины и тем самым оказывает влияние на коэффициент трения.

Согласно литературным утверждениям в инструментальном производстве с увеличением удельного давления при пластической деформации коэффициент трения уменьшается [3].

Влияние температуры обрабатываемого металла на коэффициент трения сложное. При изменении температуры изменяются сопротивление деформации,

физикохимические свойства окалины, образующей промежуточный слой. Установлено, что при нагревании коэффициент трения сначала растет, достигает максимального значения, затем уменьшается (рисунок 2). Такой ход зависимости можно объяснить тем, что сначала коэффициент трения растет в связи с окислением поверхности; в этом интервале температур образуется твердая окалина, повышающая коэффициент трения. При дальнейшем повышении температуры происходит размягчение окалины, и она начинает играть роль смазки [4].

Максимального значения коэффициент трения для стали достигает при температуре примерно 800–900 °С.

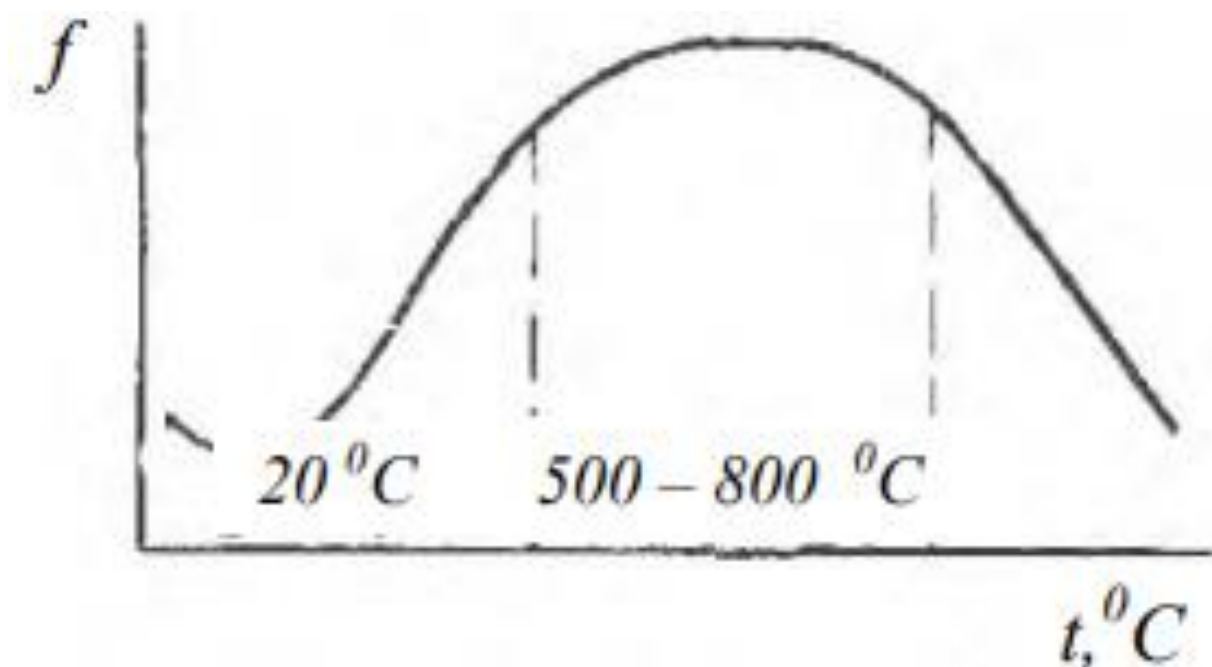


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от температуры обрабатываемого металла [4]

Горячая обработка давлением стали происходит при температурах выше 850–950 °С, т.е. в основном в области уменьшения коэффициента трения с повышением температуры. С увеличением скорости деформирования коэффициент трения снижается. Чем больше скорость, тем меньше длительность контакта на площадках соприкосновения деформируемых тел и тем меньше роль молекулярного взаимодействия. Интенсивность снижения коэффициента трения с ростом скорости уменьшается. Увеличение коэффициента внешнего трения также приводит к увеличению продольного напряжения и, следовательно,

контактных давлений. Особенно большое влияние внешнее трение оказывает при прокатке тонких полос в горячем и холодном состоянии. Так, увеличение коэффициента трения с 0,05 до 0,15 может приводить к повышению удельного давления на 30–40 %.

Толщина полосы трения (в нашем случае окружности) оказывает значительное влияние на контактное давление. Чем тоньше полоса, тем сильнее влияние внешнего трения на продольное напряжение и, следовательно, на контактное давление. С увеличением толщины полосы продольное напряжение уменьшается и при проковке высоких полос оказывается настолько малым, что практически не влияет на контактное давление.

Силовые условия прессования определяются свойствами деформируемого металла, температурным режимом, размерами заготовки, скоростью и степенью деформации, величиной контактного

В начальный момент коэффициент трения имеет максимальное значение, соответственно затраты мощности и тепловыделение в месте трущегося контакта возрастают. В процессе контакта коэффициент трения на этом участке падает и выделение теплоты уменьшается. При нагреве до 700–800 К испаряются и выгорают жировые плёнки, а коэффициент трения растёт. Понижается тепловыделение вследствие уменьшения коэффициента трения из-за появления на трущихся поверхностях жидкого металла, играющего роль смазки.

Факторы:

На коэффициент трения при ротационной сварке трением влияют, например:

Температура. Из-за высоких температур на поверхности контакта коэффициент трения может зависеть от температуры.

Материал соединяемых поверхностей. Например, для разнородных материалов коэффициент трения может отличаться.

Скорость вращения. Низкие скорости вращения могут вызывать недостаточное распределение температуры из-за низкой энергии трения, что приводит к дефектам в шве, со стороны может показаться, что коэффициент

трения в таком случае выше, однако фактически детали в такой момент выполняют функцию тормозных колодок в более явном виде.

В ряде работ [6-10] исследовался вопрос расчета тепловых потоков и результирующих моментов инерции, однако данные расчеты приемлемы для материалов, коэффициент трения которых уже известен, в случае же таких сплавов, как ВВ751П, ВЖ178П и ВЖ175-ИД, чтобы проанализировать значение μ для процесса сварки нужно провести расчет.

Исследователи в работе [6] сваривали трубки коррозионностойкой стали (SS304) наружным диаметром 19 мм, толщиной 2 мм методом ротационной сварки трением. Характеристики изучались при варьировании параметра притирки, нагрузки при деформации, времени нагрева, времени деформации и поддержании постоянной частоты шпинделя 1100 об/мин. Каждый образец был испытан на прочность на растяжение и микротвёрдость для оценки механических свойств. Механические свойства соединения увеличиваются с увеличением нагрузки при деформации и притирке. Максимальная прочность соединения 780 МПа и твёрдость 210 HV достигнуты при сварном параметре нагрузки при деформации 143 МПа и времени деформации 4 сек. Подробный анализ разрушения показывает, что сварные образцы испытаны в хрупком режиме разрушения в месте исходного металла. Анализ микроструктуры показывает, что зернистая структура в зоне сварки более крупная по сравнению с основным металлом, что свидетельствует о падении свойств относительно основного материала.

Наиболее рациональной моделью расчета крутящего момента и тепловых потоков с использованием коэффициента трения получили ученые Тракийского университета в работе [7]. Для исследования была выбрана сталь AISI 1040, сварка проводилась на экспериментальной установке с непрерывным приводом, образцы разных диаметров сварены на одинаковых режимах, регистрация изменения температуры была выполнена термопарами, а на основании полученных данных построена конечно-элементная модель для расчета теплового потока в процессе сварки. Результат был верифицирован экспериментально.

В работе [8] Саморуков М.Л. также выполнял аналитический подход к математическому моделированию температурной составляющей сварки трением, основой метода расчета послужил закон теплопроводности Фурье, который установил связь между градиентом температуры, удельным тепловым потоком и теплопроводностью в твердом теле (1).

$$q_2 = -\lambda \cdot \text{grad}T. \quad (1)$$

Как видно из формулы, тепловой поток направлен в основной материал, то есть в обратную сторону от возникновения источника роста температуры. В виду высокого давления и для упрощения принимается, что источник тепла равномерный по всей окружности стержня (как и в настоящем случае).

Тем временем боковая поверхность стержня отдает теплоту в окружающую среду с нулевой температурой при коэффициенте поверхностной теплоотдачи, α :

$$T(x, t) = T_H + \frac{q}{c_p F \sqrt{4\pi a}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \exp\left(-\left[\frac{v^2}{4a} + b\right]\tau - \frac{x^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}. \quad (2)$$

Расчет тепловых полей на второй стадии процесса сварки следует также вести по формуле (2), однако скорость движения источника в этом случае растет многократно. Эмпирической моделью установлено, что осадка, получаемая на этом этапе, не превышает 60% от суммарной осадки за весь технологический цикл сварки. Длительность этой стадии может достигать полусекунды. Причем скорость осадки и ее величина на этом этапе зависят от длительности первого этапа и от отношения давления проковки к давлению нагрева. Чем больше значение этого отношения, тем на большую величину деформируется заготовка и тем выше скорость деформации. Предельная граница деформации при этом должна удовлетворять условию:

$$P_{\text{пр}} = \sigma_{\text{в.сж.}}^T \cdot F, \quad (3)$$

Где $P_{\text{пр}}$ - осевое усилие проковки, $\sigma_{\text{в.сж.}}^T$ - предел прочности при сжатии, F - площадь контакта.

Расчет температурного поля на третьем этапе следует рассчитывать, как разность приращений температур от источника и стока теплоты:

$$\Delta T = \frac{q_2|x|}{\lambda} \left[\frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right)}{\sqrt{\frac{\pi x^2}{4at}}} + \Phi\left(\sqrt{\frac{x^2}{4at}}\right) - \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a(t-t_n)}\right)}{\sqrt{\frac{\pi x^2}{4a(t-t_n)}}} - \Phi\left(\sqrt{\frac{x^2}{4a(t-t_n)}}\right) \right] \quad (4)$$

Таким образом, основной задачей является расчет теплового потока от действия сил трения при контакте материалов на этапе нагрева – задача, решаемая как аналитическим, так и численным методами.

Материалы и методы

Для расчета коэффициентов трения использованы циклограммы сварки и параметры режимов с установки ПСТИ-400 и уже опробированные методики расчетов тепловых потоков и моментов инерции зарубежных и отечественных специалистов. Расчет выполнен, как методика вычисления неизвестного коэффициента трения при ротационной (инерционной) сварке трением новых материалов для оценки влияния его на результаты сварки (смещения, биения, осадка).

Результаты

Беря за основу модель для расчета теплового потока, который получен при контакте двух полуобразцов следующей формулой:

$$Q = \omega T. \quad (5)$$

Тепловой поток, выделяемый в любой точке контакта по версии авторов равен, исходя из полного момента (Т):

$$T = 2/3 \pi \mu P R^3. \quad (6)$$

где Т – полный момент сил, кгс/мм; N – полная мощность, кВт; Р – давление, кгс/мм²; n – относительная частота вращения, об/мин; μ – коэффициент трения. Отсюда можно выразить коэффициент трения, но если неизвестен момент и сварка не инерционная, а на непрерывном приводе, то можно найти коэффициент через другой параметр.

Данный расчет представлен для расчета мощности тепловыделения (N), чтобы оценить влияние интенсивности процесса на конечную осадку, для средней удельной мощности ($N_{уд}$), отнесенной к единице поверхности трения ($\text{Вт}/\text{мм}^2$), а формула приобретает вид:

$$N = 2/3 \pi \mu P R^3 \cdot 10^{-6}. \quad (7)$$

Следовательно:

$$N_{уд} = N / (\pi R^2) \approx 2/3 \pi \mu P R^{-3}. \quad (8)$$

Отсюда следует, что подставляя значения, снятые с циклограмм сварки можно таким образом вычислить коэффициент трения в любой ее временной промежуток и на любой точке, что предоставляет в результате две характерные кривые, а именно кривую изменения коэффициента трения в зависимости от температуры и после нескольких итераций расчета кривую изменения коэффициента трения в зависимости от радиуса выбранной точки, поскольку значения коэффициента трения от внутренней кромки через центр свариваемого сечения к внешней кромке приобретают на графике вид волны. А сам расчёт коэффициента трения, переворачивая формулу выглядит следующим образом:

$$\mu = N_{уд} / 2/3 \pi P R^{-3}, \quad (6)$$

следовательно:

$$\mu = 3 N_{уд} R^3 / 2 \pi P. \quad (7)$$

При расчете коэффициента трения в зависимости от отдаления от оси вращения и при изменении различных параметров можно резюмировать, что рассмотрении зависимостей изменения тепловыделения во времени весь процесс нагрева при сварке трением можно условно разделить на три фазы: первая (начальная), характеризующаяся преобладанием явлений внешнего (сухого или граничного) трения; вторая, начинающаяся с появления очагов схватываний и характеризующаяся процессом бурного их увеличения, третья, отличающаяся высокими температурами и тенденцией процесса к установлению сварного соединения в пластифицированном состоянии сразу после выхода с плато температур.

В первой и второй фазах процесса тепловыделение незначительно, основное количество теплоты выделяется в третьей фазе. Количество теплоты,

выделенной в первой фазе, 1%, во второй – 12%, в третьей – 87%. Нагрев деталей до состояния повышенной пластичности, необходимой для образования прочного сварного соединения, происходит в третьей фазе процесса.

Также рассматривая процесс с точки зрения механики проверочным расчетом служит определение силы трения:

$$F_{\text{тр.}} = \mu_{\text{покоя}} mg \quad (8),$$

следовательно,

$$N = mg \quad (9),$$

где N – сила реакции опоры, m – масса, $\mu_{\text{покоя}}$ для никеля по никелю = 0,8. Для определения коэффициента трения скольжения никелевого кольца по никелевому кольцу эквивалентен тангенсу угла приложения силы и рассчитан по формуле (10):

$$f_{\text{тр.ск.}} = F_{\text{тр.ск.}}/P = \text{tg}\alpha \quad (10).$$

При расчёте силы реакции опоры важно учесть, что жесткое зацепление в цанговом или кулачковом патроне полностью нивелирует значение ускорения свободного падения в виду чего у нас остается коэффициент трения, как таковой, т.к. сила тяжести в данном случае пренебрежительно мала.

Выводы

Сварное соединение образуется лишь после прекращения тепловыделения (вращения). В конце процесса сварки проводят проковку – взаимно неподвижные и охлаждающиеся детали подвергают усилию; при этом в ряде случаев величину давления при проковке, по сравнению с давлением при вращении, выбирают более высокой для того, чтобы в процессе графообразования удалить обломки разрушенных окисных пленок путем пластического течения металла, а также создание деформации среза микровыступов, которая способствует сближению поверхностей и облегчает образование молекулярных связей. Коэффициент трения меняется в по двум кривым:

- от оси вращения к периферии он возрастает, т.к. удаляется от источника тепла, график имеет вид параболы;

- рассматривая сам процесс сварки, сначала снижается на 10-20%, затем возрастает в 2-10 раз в зависимости от теплопроводности.

В совокупности зависимость прослеживается от таких параметров, как:

- давление;
 - окружная скорость;
 - температура (изменяющаяся после возникновения тепла);
 - площадь свариваемого сечения;
 - моменты (инерции, крутящий, полный момент сил);
 - удельная энергия (как множитель в расчете кинетической энергии).
-

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Елисеев Ю.С., Масленков С.Б., В.А. Гейкин, Поклад В.А. Технология создания неразъёмных соединений при производстве газотурбинных двигателей. М.: Наука и технологии. 2001. 544 с.
2. Сорокин Л.И. «Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов» «Сварочное производство». 2004. №10, стр. 8-17.
3. Anon (1979) Inertia welding: simple in principle and application. *Welding and Metal Fabrication* , 10 , 585–589.
4. D’Alvise L., Massoni E. and Walloe S. J. (2002) Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials. *Journal of Materials Processing Technology* , 125–126 , 387–391.
5. Лебедев В. К., Черненко И. А. Сварка трением: Справочник // Л.: Машиностроение. 1987. 235 с.
6. Kumar, M. D., & Palani, P. K. (2020). Characterization studies on weld strength of rotary friction welded austenitic stainless steel tubes. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.383>

7. Maalekian M., Kozeschnik E., Brantner H.P., Cerjak H. //Acta Materialia. 2008. V. 56. №12. P. 2843–2855.
8. Can A., Sahin M., Küçük M. Thermically evaluation and modelling of friction welding //Strojarstvo. 2009. V. 51. №1. P. 5–13.
9. Wenya Li, Feifan Wang Modeling of continuous drive friction welding of mild steel //Materials Science and Engineering A. 2011. V. 528. №18. P. 5921–5926.
10. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: МАШГИЗ. 1951. 296 с.

References

1. Eliseev Yu.S., Maslenkov S.B., V.A. Geikin, Poklad V.A. Technology for the creation of permanent joints in the production of gas turbine engines. M.: Science and technology. 2001. 544 p.
2. Sorokin L.I. "Weldability of heat-resistant nickel alloys" "Welding production." 2004. No. 10, pp. 8-17.
3. Anon (1979) Inertia welding: simple in principle and application. Welding and Metal Fabrication , 10 , 585–589.
4. D'Alvise L., Massoni E. and Walloe S. J. (2002) Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials. Journal of Materials Processing Technology , 125–126 , 387–391.
5. Lebedev V.K., Chernenko I.A. Friction welding: Reference book//L.: Mechanical engineering. 1987. 235 pp.
6. Kumar, M. D., & Palani, P. K. (2020). Characterization studies on weld strength of rotary friction welded austenitic stainless steel tubes. Materials Today: Proceedings, xxxx, 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.383>
7. Maalekian M., Kozeschnik E., Brantner H.P., Cerjak H. //Acta Materialia. 2008. V. 56. №12. P. 2843-2855.
8. Can A., Sahin M., Küçük M. Thermically evaluation and modelling of friction welding //Strojarstvo. 2009. V. 51. №1. R. 5-13.
9. Wenya Li, Feifan Wang Modeling of continuous drive friction welding of mild steel //Materials Science and Engineering A. 2011. V. 528. №18. R. 5921-5926.

10. Rykalin N.N. Calculations of thermal processes during welding. M.: MASHGIZ. 1951. 296 pp.

Информация об авторах

Рабинский Лев Наумович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой 903 «Перспективные материалы аэрокосмического назначения» МАИ, г. Москва, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5845-402X>; e-mail: rabinskiy@mail.ru

Фозилев Тимур Тохирович, инженер, НИО-9, МАИ; преподаватель ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»; ведущий инженер-технолог филиала АО «ОДК» «НИИД», г. Москва, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3881-1987>; e-mail: fozbourne@yandex.ru

Information about the authors

Lev N. Rabinskiy, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Department 903 "Promising Aerospace Materials" MAI (NRU), Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5845-402X>; e-mail: rabinskiy@mail.ru

Timur T. Fozilov, engineer, NIO-9, MAI; teacher of MSUT "STANKIN"; leading process engineer of the branch of JSC "UEC" "NIID", Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3881-1987>; e-mail: fozbourne@yandex.ru

Получено 03 марта 2026 ● Принято к публикации 23 марта 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026
Received 03 March 2026 ● Accepted 23 March 2026 ● Published 30 April 2026
