

ПЛАСТИЧЕСКОЕ ТРЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ

Выполнен анализ существующих взглядов на природу пластического трения при прокатке, отмечены спорные положения и противоречия, а также дискуссионность в оценке основных положений, в частности, взаимосвязи внешнего и внутреннего трения при пластической деформации. Отмечено, что ряд положений базовой науки-трибологии не могут быть применены в теории пластического трения; постановка вопроса о создании стандарта, включающего положения пластического трения, преждевременна, поскольку не устранены противоречия, существующие в этой области знаний. Отдельного обсуждения заслуживает тема законов и моделей трения, их применимости к задачам контактного взаимодействия при прокатке.

The analysis of existing views on the nature of plastic friction during rolling has been performed, controversial provisions and contradictions have been marked, and also the discussion evaluating the fundamentals, particularly, the relationship between external and internal friction during plastic deformation. Several provisions of the basic science of tribology have been noted not to be applicable to the theory of plastic friction. Formulating the issue to create the standard, which would include the provision of plastic friction, is untimely, as the contradictions existing in this area of science are still not eliminated. The topic of friction laws and models as their applicability to the problems of contact interaction during rolling deserves a separate discussion.

Трение лежит в основе процесса прокатки и необходимым условием успешного решения теоретической или прикладной задачи прокатки является удачный выбор и использование имеющихся научных достижений в области пластического трения. Существуют различные точки зрения на природу внешнего трения при прокатке, по-разному воспринимается применимость законов и моделей трения [1-10]. Единство мнений по вопросам контактного взаимодействия не достигнуто, более того, обсуждение порой носит острый дискуссионный характер [3-6, 9]. По мнению одного из авторов дискуссии [6]: «...в понимании пластического трения все еще возможны сильные различия». Отсутствие единства мнений по основным положениям пластического трения усложняет решение практических задач, делает их результаты неоднозначными. Необходимым условием успешного решения задач становится анализ ранее установленных закономерностей, внесение в них уточнений и дополнений.

Целью настоящей работы является анализ существующих взглядов на природу пластического трения при прокатке, выявление спорных положений и противоречий, развитие подходов, в наибольшей степени отвечающих положениям базовой науке – трибологии и позволяющих повысить точность решения прикладных задач.

В теории прокатки и других видов обработки металлов давлением накоплен большой научно-практический материал, связанный с пластическим трением, многие достижения в этой области обязаны трибологии как базовой науке. Вместе с тем фундаментальные положения трибологии, сформировавшиеся к настоящему времени, термины и определения не предназначены для достаточно полного учета особенностей трения при пластической деформации. В трудах по трибологии пластическая деформация изучается в тех случаях, когда она имеет место в качестве составляющей внешнего трения. Это происходит при исследованиях механизма износа, перехода от внешнего трения к внутреннему [11]; во всех этих случаях процесс рассматривается в границах приконтактных слоев. Случаи объемной пластической деформации металлов в трибологии не затрагиваются, поскольку они являются объектом исследований других областей знаний. Наиболее общие положения внешнего трения твердых тел отражены в справочных материалах [12-14] и стандартах [15, 16]. Появление стандарта [15] вызвало противоречивые мнения, в частности, у авторов возникли замечания по терминологии [17-19]. Судя по широкому предназначению стандарта [15] (в стандарте не оговорено какое-либо ограничение по его применению) его действие может распространяться и на пластическое трение. Это дало основания исследователям высказать замечания в адрес стандарта, в том числе, и с точки зрения его применимости для условий пластического трения. Замечания и альтернативные мнения носят дискуссионный характер, в этой связи обратимся к тем положениям стандарта [15], которые вызвали дискуссию. Термин «внешнее трение» вызывает возражения, поводом для этого служит формулировка стандарта [15]: «Внешнее трение (трение) – явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним». Предлагаются альтернативные определения: «Трение твердых тел – явление и процесс, представляющие одну из форм диссипации механической энергии, неизбежной при контактировании и относительном перемещении кинетически и динамически сопряженных твердых тел и рабочей или внешней среды, обуславливающие сопротивление перемещению в направлениях, касательных поверхностям раздела, износ и энергетические потоки в трибосистеме» [17], «Трение – диссипативный процесс возникновения и разрушения механических и (или) физико-механических связей на контакте двух тел, обуславливающий противонаправленное сопротивление относительному смещению или стремлению к смещению по контактным поверхностям и изнашивание трущихся тел» [18]. Авторы [17] в определении добавляют признаки диссипативности процесса и износа, выделяя диссипацию как основной признак трения, в то время как более существенным является фактор сопротивления относительному перемещению, являющийся причиной возникновения трения. Диссипация энергии при трении (если она имеет место) является вторичным (сопутствующим) признаком, следствием трения (равно как и износ). Авторы также не принимают во внимание, что в ограниченных случаях износа может не быть (трение покоя) и в этом случае процесс перестает быть диссипативным. Альтернативные определения предлагаются

и для других терминов: изнашивание, трение покоя, трение движения, трение скольжения, трение качения, сила трения, коэффициент трения. Ряд замечаний делается с позиций особенностей пластического трения [18], в частности, отмечается, что отсутствует термин «неполная сила трения покоя», характеризующий условия трения в процессах пластического течения. Авторы [17, 18], придавая определениям научно обоснованный вид, высказывают полезные замечания, вместе с тем упускают из внимания тот факт, что в стандарте не должны присутствовать спорные (дискуссионные) положения, он должен отражать общепринятые положения. Кроме того, стандарты рассчитаны не только на научную аудиторию, специализирующуюся в области трибологии, но и на широкий круг пользователей, представляющих различные области технических знаний и этот подход в стандарте сохранен.

Замечания по стандарту [15] с нашей точки зрения могут быть сведены к предложению уточнить термин «Коэффициент сцепления», который означает отношение наибольшей силы трения покоя двух тел к нормальной относительно поверхностей трения силе, прижимающей тела друг к другу. Указанный термин в существующем виде вызывает ассоциации скорее о чисто механическом взаимодействии двух тел, нежели той динамике, которая в него заложена. Поскольку переход от состояния покоя к скольжению сопровождается изменением скорости от нуля до некоторой величины и имеет место динамическая составляющая, то ее следовало бы отразить в терминологии и такой термин в большей степени отражал бы физическую сторону процесса. (В практике трибологии существует не вошедший в стандарт термин «Динамический коэффициент трения», который относится к торможению и представляет собой мгновенный коэффициент трения при номинальной нагрузке и относительной скорости скольжения, не равной нулю [14].)

Если оценивать стандарт [15] с позиций пластического трения, то видно, что кроме отмеченных автором [18] неучтенных признаков пластического трения, отсутствуют и некоторые другие. В теории прокатки существуют термины: «коэффициент трения при захвате», «коэффициент трения при установившемся процессе», «зона скольжения», «зона прилипания» и другие, существование которых никак не отражено в стандарте. Из сказанного можно сделать следующие выводы. Участие в стандарте [15] термина «внешнее трение» означает то, что он не предназначен для прямого применения к телам, находящимся в состоянии неупругости или пластической деформации. Стандарт [15] может быть использован в области пластического трения в части общих признаков с трением твердых тел. Процессы трения твердых тел и пластического трения кроме общих признаков имеют существенные отличия, по этой причине нет необходимости их сравнивать в полной мере и/или объединять едиными терминами. Постановка вопроса о создании стандарта, включающего положения пластического трения, преждевременна, поскольку не устранены противоречия, существующие в этой области.

Виды, механизмы и теории трения. Современные теории пластического трения базируются на теоретических основах трения твердых тел, поскольку оно является наиболее близким аналогом для условий контактного взаимодействия тел, одно из которых находится в пластическом состоянии. Различия отдельных теорий трения твердых тел включают комплекс признаков, среди них механизм контактного взаимодействия (механическое зацепление, адгезия, их сочетание), физико-химические процессы на контакте, механизмы изнашивания и другие. В работе [20] теории трения представлены тремя группами, в работах более позднего периода [11] приводится классификация, включающая 4 группы теорий трения. Первая группа объясняет трение как результат подъема по микронеровностям, вторая – результат молекулярного взаимодействия между двумя твердыми телами, третья – объясняет трение за счет деформирования некоторого объема при внедрении в него выступов контртела. четвертая группа – комбинированные теории трения. Существуют также энергетическая теория и другие [14]. По оценке специалистов в области трибологии [14] наиболее разработанной считается молекулярно-механическая теория, созданная И. В. Крагельским. Пластическое трение по своим признакам не входит ни в одну теорий трения поскольку некоторые его особенности имеют принципиально другую физическую основу.

Внешнее и внутреннее трение при прокатке. Пластическое трение при прокатке сопровождается объемными процессами, происходящими в деформируемом теле. Названные процессы содержат свойственную только процессу прокатки физическую природу и тем самым на контакте металла с деформирующим инструментом создают комплекс отличий от трения твердых тел. Основой отличий является присутствие внутреннего трения. Внутреннее и внешнее трение сопровождает многие технические и природные процессы. В самом общем случае оба вида трения могут протекать независимо друг от друга, внутреннее трение может не сопровождаться (не вызываться) внешним трением и наоборот. Особенности внешнего и внутреннего трения достаточно подробно освещены в фундаментальном труде [20], в работе по трению твердых тел этому же вопросу автор [11] посвящает содержательный параграф «Различие в механизме внешнего и внутреннего трения». В нем он ставит вопрос: «Является ли различие между внешним и внутренним трением количественным или качественным?». Отвечая на поставленный вопрос, автор [11] говорит, что в первом случае закономерности внутреннего трения могут быть распространены на внешнее, тем самым, как бы предполагая, что внешнее трение является вторичным по отношению к внутреннему и между ними могут быть сходства. В то же время, он утверждает, что единственным сходством является то, что оба вида трения являются диссипативными процессами. Далее, приводит основные различия между двумя видами трения по следующим признакам: характер касания, направление смещения, характер смещения, градиент механических свойств по глубине. При внешнем трении контакт двух твердых тел всегда дискретен, он происходит в отдельных точках, при внутреннем трении поверхность контакта непрерывна и не зависит от нагрузки. При внутреннем трении происходит ламинарное перемещение материала в направлении вектора относительной скорости, при внешнем трении материал перемещается в направлении, перпендикулярном к вектору относительной скорости. При внешнем трении образование и разрушение связей локализуется в тонком поверхностном слое, при внутреннем – деформативная зона охватывает весь объем. Для внешнего трения необходим положительный градиент механических свойств по глубине, переход к отрицательному характеризуется внутренним трением. Кроме названных отличий автор приводит еще одно, можно сказать обобщающее: «Природа внутреннего трения едина, она связана с передачей количества движения от слоя к слою. Природа внешнего трения двойственна, она обусловлена преодолением адгезионных сил, возникающих между двумя телами и преодолением сопротивления

объемному деформированию материала, обтекающему неровности».

Среди специалистов в области трибологии и смежных областей знаний не выработано единства мнений в определении термина «внутреннее трение». В работе [14, с. 38] определение звучит так: «Внутреннее трение» – явление сопротивления относительно перемещению частей одного и того же тела». По сути, это определение вязкости, и по этой причине больше подходит для жидкостей и газов, для твердых тел оно является недостаточно полным. В работе [21, с. 13] приведено следующее определение: «Трение называют внутренним, если оно сопутствует и противодействует относительно перемещению частей одного и того же тела». Определение также достаточно близкое к характеристике вязкости, что и отмечает сам автор [21, стр. 13]: «В первую очередь этот термин применяется к телам жидким и газообразным, отличающимся легкой подвижностью своих частей относительно друг друга». В физике металлов можно встретить определение, в котором внутреннее трение представлено как свойство твердого тела: «Внутреннее трение является свойством твердого тела, характеризующим его способность необратимо рассеивать энергию механических колебаний» [22, с. 5]. Последнее определение нельзя назвать удачным, поскольку процесс и явление сводится к диссипации энергии, причем в форме свойств материала и не указывается причина возникновения внутреннего трения. Автор [23], затрагивая вопросы пластичности металлов, не касается темы внутреннего трения. Другие авторы, затрагивая в той или иной мере вопросы внутреннего трения, представляют его как собой совокупность различных процессов внутри твердого тела, приводящих к необратимому рассеянию механической энергии при деформации. В таких определениях указывается причина возникновения внутреннего трения – деформация, но не всегда подчеркивается какая. Обобщая мнения различных авторов, определение внутреннего трения можно представить в следующем виде: «Внутреннее трение» – совокупность различных процессов внутри твердого тела при его неупругом деформировании». В совокупности различных процессов подразумевается участие, в частности, диссипации энергии и сопротивления относительно перемещению (равно как и сопутствие относительно перемещению [21, с. 13]) частей одного и того же тела. Кроме того, предполагается связь внутреннего трения с другими, тесно примыкающими понятиями, о которых говорит автор [20]: пластичность и текучесть твердых тел, упруго-вязкие или упруго-пластические свойства твердых тел и их вязкость. Понятие «неупругое деформирование» в предлагаемом определении подчеркивает, что внутреннее трение связано с двумя различными группами явлений – неупругостью и пластической деформацией. (Неупругость является переходным состоянием материала и представляет собой отклонение от свойств упругости при деформировании тела в условиях, когда остаточные деформации практически отсутствуют [14]).

Среди специалистов в области обработки металлов давлением нет единства мнений по вопросам внешнего и внутреннего трения, встречаются и прямо противоположные точки зрения. В теории прокатки изучаются преимущественно макропроявления внутреннего трения, такие как уширение, вытяжка, заполнение калибров и другие. Не всегда вопросы внешнего трения рассматриваются во взаимосвязи с внутренним, о чем, например, говорит автор [24, с. 11]: «...всегда возникает вопрос о механизме внешнего трения с внутренним, вопрос, который до сих пор остается в какой-то мере дискуссионным». Автор, справедливо говоря о дискуссионности вопроса, в этой же работе [24, с. 12] высказывает утверждение, которое может быть расценено как спорное: «...внешнее трение является формой проявления внутреннего трения». То есть, автор считает, что внешнее трение не является каким-либо самостоятельным физическим явлением, а представляет собой проявление внутреннего трения. Авторы [2, с. 12] расценивают взаимосвязь внешнего трения с внутренним несколько иначе: «При развитой пластической деформации контактные скольжения и объемные деформации вблизи контактной поверхности можно считать одновременно протекающими и взаимосвязанными процессами внешнего и внутреннего трения».

Утвердившееся понятие «внутреннее трение твердых тел» (термин заимствован из области гидравлики) нельзя признать достаточно удачным. Это приводит к тому, что некоторые авторы воспринимают понятие «внутреннее трение твердых тел» излишне буквально и это подводит их к желанию сравнивать его с внешним трением. (Следует также отличать внутреннее трение в жидкостях и газах от внутреннего трения твердых тел). Различия во мнениях сформировались в определенной мере потому, что рассмотренные вопросы внешнего и внутреннего трения часто происходит без дополнительной оценки их взаимосвязи и приоритетности проявления. Если оценивать процессы и механизмы по участию в них внешнего и внутреннего трения, то можно выделить характерные их виды. К первому относятся все узлы механизмов, где присутствует внешнее трение, но оно нежелательно и его всячески стремятся минимизировать (подшипниковые узлы, всякого вида кинематические звенья и т. д.). Ко второму типу относятся механизмы, построенные на использовании внешнего трения (фрикционные механизмы). В первом и втором случаях внутреннее трение является нежелательным явлением, поскольку следствием его появления становится повышенный износ элементов пары трения и наступление ремонтной или аварийной ситуации. Третий вид характерен для процессов, где участвуют тела, находящиеся в пластическом состоянии или состоянии неупругости. Особенностью является то, что названные тела (по меньшей мере, в отдельной своей части) подвергаются только внутреннему трению. Такое состояние характерно, например, для случаев растяжения образцов с переменным по длине сечением. К четвертому типу относятся процессы, построенные на участии одновременно внешнего и внутреннего трения. Сюда относятся, в частности, все процессы обработки металлов давлением. Среди последних различие в назначении внешнего трения и в том, какова роль и очередность его проявления в каждом отдельно взятом процессе, то есть, является ли оно первичным или возникает вследствие пластической деформации. К первым относятся процессы прокатки и профилигибочного производства (а также совмещенные процессы, включающие признаки процесса прокатки), они построены на использовании внешнего трения в качестве создателя первичного силового взаимодействия металла с валками. Сказанное относится ко всему циклу прокатки – начальному моменту (естественный захват) и установившемуся процессу вплоть до выхода раската из валков. В названных процессах внешнее трение является необходимым условием, в необходимых случаях его достаточно регулируется (например, применением технологической смазки при холодной прокатке). В других видах обработки металлов давлением, проявление внешнего трения может наступать вследствие пластической деформации тела (и, соответственно, наличия внутреннего трения) или возникать практически

одновременно. Примером первого случая может быть осадка в параллельных бойках. При определенной относительной высоте детали пластическая деформация вначале локализуется в средней по высоте ее части (образуется бочкообразность), затем по мере роста обжатия наступает перемещение металла в приконтактной зоне, которое переходит на контакт его с инструментом. Второй случай более характерен для процесса волочения. Понимание очередности проявления вида трения при прокатке является важным не с позиций временного интервала, а, прежде всего, с точки зрения установления причинно-следственной связи, что, в свою очередь, необходимо для достоверной оценки кинематических и силовых характеристик процесса.

Законы и модели трения при прокатке. В теории обработки металлов давлением, вопрос о применимости тех или иных законов трения носит дискуссионный характер. Свидетельством тому является, например, дискуссия, возникшая на страницах печати [3-7, 9]. Разделились мнения, в частности, по терминологии – по каким признакам разделять законы и модели трения. Автор [3] считает, что моделью является математическое описание эпюры трения, его оппонент [4, 6] не соглашается с такой трактовкой. Автор в работах [7, 8, 10] все зависимости называет моделями, включая закон Амонтона. Достаточно убедительное определение модели приводится в работе [14, с. 131]: «Модель – объект (явление, процесс, установка, знаковое образование), находящийся в состоянии подобия к моделируемому объекту». Модель и условие можно считать равнозначными (тождественными) понятиями. Физический закон, по-видимому, должен характеризовать существующее в природе явление (или процесс) через причинно-следственную связь между объективными параметрами явления (или процесса) и должен быть выражен в строгой словесной и/или математической формулировке. (Точную формулировку физического закона в законченном виде в технической литературе встретить трудно). Можно сказать, что законы открываются, модели создаются. Рамки настоящей работы не позволяют осветить затронутый вопрос с достаточной полнотой, эта тема заслуживает отдельного обсуждения.

Выводы. Выполнен анализ существующих взглядов на природу пластического трения при прокатке, отмечены спорные положения и противоречия, а также дискуссионность в оценке основных положений, в частности, взаимосвязи внешнего и внутреннего трения при пластической деформации. Отмечено, что ряд положений базовой науки-трибологии не могут быть применены в теории пластического трения. Постановка вопроса о создании стандарта, включающего положения пластического трения, преждевременна, поскольку не устранены противоречия, существующие в этой области знаний. Отдельного обсуждения заслуживает тема законов и моделей трения, их применимости к задачам контактного взаимодействия при прокатке.

Список литературы

1. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1973. – 288 с.
2. Леванов А. Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин [и др.]. – М. : Металлургия, 1976. – 416 с.
3. Зильберг Ю. В. Закон и модели пластического трения / Ю. В. Зильберг // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 22 – 24.
4. Хайкин Б. Е. Рецензия на статью Ю.В. Зильберга «Закон и модели пластического трения» / Б. Е. Хайкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 24 – 25.
5. Ответы автора Ю. В. Зильберга на замечания рецензента Б.Е. Хайкина / Ю. В. Зильберг // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 25.
6. Хайкин Б. Е. Операционалистический подход к проблеме трения в условиях обработки металлов давлением / Б. Е. Хайкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 26 – 27.
7. Василев Я. Д. Уточнение модели напряжений трения при прокатке / Я. Д. Василев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 5, – С. 19 – 23.
8. Василев Я. Д. Разработка новой модели напряжений трения при прокатке. / Я. Д. Василев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №5. – С. 28–32.
9. Зильберг Ю. В. Замечания по дискуссии о пластическом трении. / Ю. В. Зильберг // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2002. – № 9. – С. 26–29.
10. Василев Я. Д. Модель напряжена трения при прокате. / Я. Д. Василев // Производство проката. – 1998. – №6. – С. 2–8.
11. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
12. Трение, изнашивание и смазка / под ред. И. В. Крагельского. – М. : Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.
13. Трение, изнашивание и смазка / под ред. И. В. Крагельского. – М. : Машиностроение, 1979. – Кн. 2. – 358 с.
14. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин./В. Д. Зозуля, Е. Л. Шведков, Д. Я. Рвинский, Э. Д. Браун. – К. : Наукова думка, 1990. – 260 с.
15. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения : ГОСТ 27674-88. – [Дата введения 01. 01. 89]. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. –20 с.
16. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення : ДСТУ 2823-94. – [Чинний від 01.01.96]. – К. : Держстандарт України, 1995. – 30 с.
17. Протопопов Б.В., Бершадский Л.И., Охремчук Л.Н. Совершенствование нормативно-технического обеспечения качества углов трения машин и механизмов. Качество. Обзорная информация. УкрНИИНТИ. Сер. Упр. качеством продукции, вып. 7, Киев, 1989.
18. Зильберг Ю. В. О некоторых терминах трения, изнашивания и смазки / Ю. В. Зильберг // Трение и износ. – 1991. – Т. 12, № 5. – С. 885–890.
19. Матвеевский Р. М. Замечания к статье Ю. В. Зильберга «О некоторых терминах трения, изнашивания и смазки» / Р. М. Матвеевский // Трение и износ. – 1991. – Т. 12, № 5. – С. 891–892.
20. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Т. 4. Материалы по физике внешнего трения, износа, и внутреннего трения твердых тел / В. Д. Кузнецов. – Томск: Красное знамя, 1947. – 542 с.
21. Дерягин Б. В. Что такое трение? / Б. В. Дерягин. – М. : Изд. АН СССР, 1952. – 244 с.
22. Криштал М. А. Внутреннее трение и структура металлов / М. А. Криштал. – М: Металлургия, 1976. – 375 с.
23. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов / Я. И. Френкель. – Л : Изд-во «Наука», 1972. – 424 с.
24. Макушок Е. М. Механика трения / Е. М. Макушок. – Минск : Наука и техника, 1974. – 254 с.