

УДК 629.1.039

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОРЕХОДНЫХ ЭКОЛОГИЧНЫХ ВЕЗДЕХОДОВ НА ВОЗДУХООПОРНЫХ ГУСЕНИЦАХ

А.И. Азовцев, В.Ф. Гаманов, С.В. Луцай

Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского. г. Владивосток

Предложен новый принцип движения – на воздухоопорных гусеницах. Обеспечивается уникальная универсальность ходовых качеств, обеспечивающих мореходность, вездеходность и амфибийность при щадящем воздействии на грунт. Разработаны мореходные вездеходы для нужд комплексного освоения шельфа и побережья.

Реализовано движение обшивки судна по направлению вектора скорости набегающего потока. Этот эффективный метод снижения сопротивления воды движению судна оказался удобоприменимым в форме воздухоопорных гусениц (ВГ). Предварительным анализом обосновано, что гусеничный движитель может быть эффективным на морских и речных судах только при площади его горизонтальной проекции соизмеримой с площадью смоченной поверхности судна. Размещение движителей под корпусом исключает их площадь из площади смоченной поверхности судна, что благоприятно влияет на их эффективность [1].

Испытание моделей ВГ в лабораториях ДВВИМУ, в гидроканале Института механики МГУ, в гидроканале НПО Промрыболовства в г. Калининграде и в морских условиях г. Владивостока позволили накопить материал для оценки эффективности такого движителя [2]. Экспериментально обоснована рациональность использования ВГ как опорнодвигательного устройства с широчайшим спектром мореходных и вездеходных качеств, что позволяет создавать на их основе амфибийные транспортные средства с уникальной универсальностью. Стадия поисковых исследований стала убедительным доказательством рациональности создания мореходных вездеходов как наиболее остро необходимого звена в совершенствовании транспортных и транспортно-технологических операций в условиях необорудованного побережья. Результаты поисковых исследований получили высокую оценку на выставке-ярмарке ВДНХ СССР «Новые специализированные и экологически чистые виды транспорта» в 1990 г.: ДВВИМУ (ныне МГУ) им. адм. Г.И. Невельского награждено дипломом первой степени, золотой и серебряной медалями за разработку нового принципа движения – на воздухоопорных гусеницах.

Необходимостью освоения Севера и Дальнего Востока, прибрежной зоны и мелководья шельфа обосновываются задачи создания экономически оправданного экологичного вездеходного транспортного средства для выполнения перевозок и технологических операций. Удаленность обжитых районов и отсутствие промышленной базы, трудности подготовки кадров и организации ремонта, дороговизна доставки транспорта к месту его эксплуатации дают основание предполагать выгоды от применения транспорта универсального.

Самый сложный набор требований к условиям эксплуатации универсального транспорта предъявляют специалисты морского флота, где мореходный амфибийный вездеход необходим для бесперевалочной доставки грузов с судов на береговые базы в условиях отсутствия причалов, что характерно для большинства пунктов разгрузки судов в Арктике и на побережье Дальнего Востока. Необходимо обеспечить безопасную погрузку грузов у борта судна на расстоянии 2...5 км от берега при волнении 3...4 балла, в битом льду, на припайной или плавающей льдине. Для перехода от судна к берегу необходимо обеспечить мореходность 4 балла, проходимость в битом льду, плавность хода на льду с торосами, проходимость по заснеженному льду, безопасный сход с припайного льда в воду или в битый лед, надежный выход из воды на лед, устойчивое движение одним бортом по льду, другим по воде, преодоление прибойной полосы и выход на берег при волнении 4 балла. Для сохранности груза качка в море должна быть плавной, недопустимо интенсивное заливание и обмерзание (обледенение) груза. В береговых условиях необходимо преодоление уклонов в полном грузу 25°. При движении по травянистой тундре требуется сохранность дернины.

Необходимо обеспечить устойчивое движение при боковом уклоне до 15°, движение по тонкому разрушающемуся льду замерзающих рек и озер, по разрушающемуся льду весной.

Высокая стоимость простоя дорогостоящего снабженческого судна обуславливает требование высокой скорости доставки груза: на тихой воде до 15 км/ч, на ровном грунте до 30 км/ч. Торосы и валуны высотой до 0,5 м должны преодолеваются без значительного снижения скорости. На предельно малой скорости должны преодолеваются препятствия высотой до 1 м и рвы (трещины) шириной до 3 м с возможно меньшим обрушением стенок рва.

Рыбная промышленность заново осваивает побережье Дальнего Востока с развитием прибрежного промысла рыбы и морепродуктов, с созданием обширных плантаций марикультуры. Освоение бухт и заливов уже началось. Следующий этап – освоение открытого побережья. Для защиты флота от штормов летом необходимо строить весьма дорогостоящие ковши с причалами, которые зимой замерзают, и флот оказывается неработоспособным. Определена целесообразность применения в таких ус-

ловиях мореходных вездеходов. В дополнение к требованиям, предъявляемым к такому транспорту торговым флотом, здесь предъявляются более высокие требования к мореходности в прибойной полосе.

Уровень живучести судов, совершающих плавание в арктических водах, к сожалению, допускает гибель судна при обширных повреждениях и пожарах. В Канаде налажен выпуск мореходных гусеничных вездеходов для спасения во льдах.

Одно из выгоднейших направлений использования универсальности мореходного амфибийного транспорта – комплексное освоение шельфа и побережья. Обслуживание буровых установок, плантаций марикультуры, комплексная геологоразведка на мелководье шельфа и на побережье, вывоз леса и минерального сырья, прибрежный промысел рыбы и морепродуктов, сбор штормовых выбросов, выполнение спасательных работ рационально выполнять таким транспортом.

Многолетние исследования проводились повторяющимися циклами аналитических исследований, численного моделирования, проектирования и испытания моделей. При этом в комплексе использовались методы проектирования ленточных конвейеров большой мощности, теории и численных методов эластичных конструкций, проектирования амфибийных СВП и плавающих машин, теории ко-

рбля. На основе исследований сложилось новое направление – теория проектирования транспортных средств на воздухоопорных гусеницах (ТСВГ).

Архитектурно-конструктивные типы ТСВГ и их облик связаны с особенностями воздухоопорных гусениц. Полный объем преимуществ ВГ возможен при больших габаритах в сравнении с гусеницами равной несущей способности традиционных вездеходов, чем обусловлена соизмеримость габаритов ТСВГ с габаритами СВП и платформ на воздушной подушке.

В поисках рациональных областей применения ТСВГ и по мере исследований ВГ были рассмотрены различные компоновочные решения преимущественно для низких скоростей хода в диапазоне грузоподъемности от сотен килограммов до сотен тонн.

Многолетние консультации с заказчиками сформировали представление об универсальном экологичном мореходном вездеходе. На рис. 1 представлено предпроектное изображение размерного ряда ТСВГ грузоподъемностью 5, 10 и 40 т. – ТСВГ-5, ТСВГ-10, ТСВГ-40(60).

Общее в их компоновочном решении – сходство с гусеничными вездеходами и плавающими машинами. Каждое из этих транспортных средств имеет две ВГ, разнесенные поперек так, что между их гусеницами установлена грузовая платформа. Базовой маркой этого ряда является ТСВГ-40(60), предназначенное преимущественно для разгрузки судов на необорудованный берег и транспортно-технологических работ в тундре и лесотундре. Для перевозки труб в плетях торцы грузовой платформы открыты. Заливаемость исключена подъемом платформы над уровнем воды во всех режимах эксплуатации. Предусмотрена установка трех контейнеров ИСО 1СС и 1С. Предполагается самовыгрузка контейнеров в малых портах и базах. Рубки капотируют носовую часть ВГ и защищают верхнюю ее ветвь от встречного потока воздуха, дают удобный обзор для управления при наезде на препятствие. При необходимости соблюдать экологичность воздействия на грунт грузоподъемность не должна превышать 40 т. В других условиях допустима нагрузка 60 т.

На базе ТСВГ-5 намечается создание бортового спасателя для судов арктического плавания. Спасение с буровых установок на шельфе, при нагонах льда, взломах припая, наводнениях и ледоходах может выполняться без специального спасательного приспособления.

Спроектирован в МАИ универсальный промышленный вездеход ТСВГ-20. В условиях открытого побережья Сахалина и Курил необходимо выполнять круглогодично промысловые и спасательные работы, обслуживать буровые установки и плантации марикультуры на шельфе, по штормовому предупреждению или в ожидании нагонов льда вытаскивать на берег легкие плавсредства и спускать их на воду при благоприятной обстановке. Беспричальные береговые базы смогут получать грузы с судов на рейде в двадцатифутовых контейнерах. Откры-

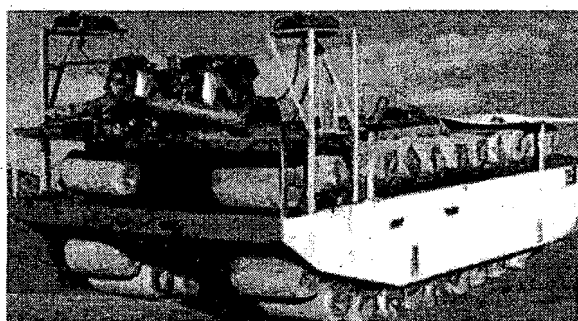
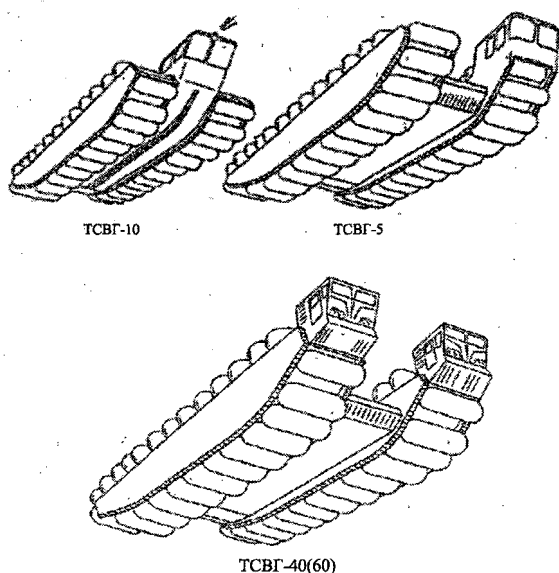


Рис. 1. Предпроектное изображение размерного ряда ТСВГ и фотография крупномасштабной мореходной модели

формированной пневмоплицы определяется по условию

$$H_{HP} = D_{II} \left[1 - \frac{P_{II}}{P_{IP}} (2 - \pi/2) \right].$$

Здесь P_{IP} — избыточное давление в пневмоплице на твердом грунте.

При проектной нагрузке задан вес транспортного средства G и заданы $K_{пол}$, H_r . При этом давление в пневмоплице соответствует допустимому давлению на грунт $[P_{IP}]$. Алгоритм счета проектной геометрии ВГ завершается расчетом необходимого диаметра пневмоплиц

$$D_{II} \frac{H_{HP} [P_{IP}]}{[P_{IP}] - P_{II} (2 - \pi/2)}.$$

Для промышленного мореходного вездехода ТСВГ-20 для проектного состояния нагрузки расчетом получены избыточное давление $P_{II} = 14\,000$ Па, $D_{II} = 1,0$ м, $H_{HP} = 0,7$ м.

Многообразие условий эксплуатации определяет множество сил и моментов, способных создавать продольные наклоны ТСВГ. На рис. 3 дана схема возникновения продольного восстанавливающего момента $M_{ш}$ при наклонении на угол ψ под действием дифференцирующего момента $M_{диф}$. Момент восстанавливающий $M_{ш}$ определяется как момент пары сил: сила веса G приложена в центре тяжести ЦТ, сила поддержания — в центре контактного пятна С. Расстояние между линиями действия этих сил $l_{ш}$ — плечо продольной статической устойчивости, при $z_{го} = 0$ $l_{ш} = A$. Выявлена и представлена в форме теоремы особенность продольной устойчивости.

Если выполнены все условия первой теоремы, то на плоском горизонтальном грунте положение продольного метацентра определяется центром кривизны нижней ветви гусеничной ленты при свободном ее провисании под действием избыточного давления в бесконтактном режиме.

В техническом задании на ТСВГ, в отличие от требований к платформе на ВП, предлагалось обеспечить возможность надежного перемещения по тундре при любом возможном варианте размещения от 1 до 3 двадцатифутовых контейнеров массой по 20 т. При разгрузке судов с использованием платформы на ВП МПВП-40 снятие одного из контейнеров не позволяет буксировать ее к месту выгрузки другого контейнера из-за нарушения центровки. Расчетом показано, что для ТСВГ-40 сформулированное требование соблюдалось с большим запасом.

Движение на воздухоопорных гусеницах как новый принцип движения может получить право на распространение только при обеспечении поперечной устойчивости с гарантией неопрокидывания в эксплуатационно необходимых и экономически целесообразных условиях. Поперечная устойчивость как фундаментальное эксплуатационное качество ТСВГ изучается применительно к различным стадиям проектирования, конструктивно-компоновочным решениям, эксплуатационным ситуациям.

В приближенных решениях показана кубическая зависимость восстанавливающего момента от ширины ленты V_L . При проектировании ТСВГ можно малыми изменениями V_L получать значительные изменения устойчивости. Оболочки с большой избыточной длиной обеспечивают малую устойчивость. Если ВГ образована раздуванием почти втуговую натянутой на барабаны ленты, то значительной устойчивости можно ожидать даже при умеренной ширине ленты.

В целом опорные качества и устойчивость ТСВГ на грунте обеспечены компромиссно. Задачи вертикальной жесткости ВГ и расчета отдельно продольной и поперечной устойчивости решены, сведены с помощью линейных по углу наклона выражений к привычным метацентрическим оценкам. Приемлемость такого подхода к проектированию подтверждена в ходе испытаний крупномасштабной мореходной модели. Множество использованных допущений оправдано сложностью и новизной задачи.

На ранних стадиях проектирования выполняется приближенная оценка посадки и устойчивости, в частности, осадки в полном грузе и порожнем при наличии ВП в ВГ и без поддува ВГ на воде.

Тяга ВГ для движения ТСВГ должна преодолевать сопротивление грунта, весовую составляющую сопротивления при преодолении уклона. Имеет место сопротивление воздуха. Внутренние потери ВГ определяются сопротивлением в осях барабанов, сопротивлением от трения в узлах уплотнения ВП. Возникает сопротивление от перематывания бортовых уплотнений ВГ в пазах барабанов. Транспортная лента, используемая в качестве ленты гусеничной, создает сопротивление перематыванию через барабаны. Тяговые расчеты ТСВГ выполняются с учетом этих особенностей и с учетом опыта расчетов вездеходов и ленточных конвейеров.

Анализ тяговых способностей узла барабан-лента определяет четыре способа привода: привод только носовым барабаном; привод только кормовым барабаном; оптимальное для заданного коэффициента трения распределение тяги между кормовым и носовым барабанами; привод кормовым барабаном при ступенчатом регулировании тяги носового ба-

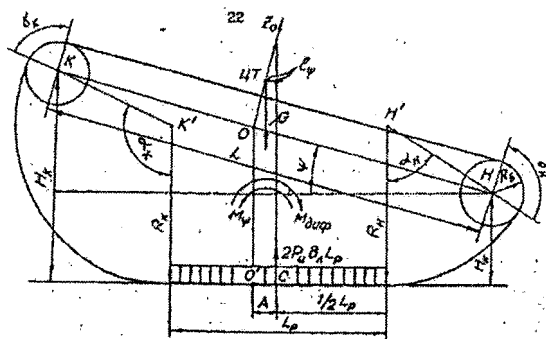


Рис. 3. Схема возникновения продольного восстанавливающего момента

рабана. Большой резерв увеличения тяги обнаружен при повышении давления в полости ВГ. Повышение избыточного давления снижает величину минимально необходимого коэффициента трения. Расчеты тяговой способности выполняются для мокрой ленты. Во всех режимах работы тяга может быть обеспечена приводом только кормовых барабанов.

Возможность повышения давления увеличением оборотов нагнетателя предложено включить в проект для повышения проходимости увеличением клиренса, поперечной остойчивости и снижением необходимого коэффициента трения ленты на барабане.

Нарастание сопротивления воды движению судна при увеличении скорости обтекания корпуса определяет эффективность снижения сопротивления уменьшением скорости обтекания смоченной поверхности корпуса при сохранении скорости хода. Эта, казалось бы, парадоксальная ситуация давно привлекает исследователей. Один из методов реализации этой идеи называют движение обшивки судна по направлению вектора скорости набегающего потока. Такое движение рационально обеспечить образованием смоченной поверхности в виде широких гусеничных лент.

Классический подход к определению мощности, потребляемой двигателем, при уравнивании сопротивления судна с упором его двигателя для ТСВГ весьма сложен, поскольку на поверхности ВГ возникают одновременно гидродинамические силы и сопротивления, и тяги. При порожних пробегах возможны случаи, когда жесткие конструкции корпуса полностью будут над водой, в воде только двигатели, плавучесть которых обеспечивает поддержание ТСВГ. Для таких транспортных средств рационально устанавливать прямую связь между скоростью хода и подводимой к гусеницам мощностью.

На ранних стадиях проектирования оценку мощности приближенно получили на основе безразмерных гидродинамических характеристик, полученных при испытаниях моделей. Расчетом определено, что мощность двух гусениц ТСВГ-20 составляет 126,4 кВт при скорости хода 8 узлов. При этом отношение скорости хода к скорости перематывания гусениц составляет 0,55. Скорость проскальзывания ВГ относительно воды 3,37 м/с обеспечивает упор 16,9 кН.

Опыт проектирования и освоения новых типов амфибийных транспортных средств на воздушной подушке определил эффективность первоочередного исследования вертикальной качки для оценки соизмеримости периодов собственных колебаний с периодом характерного для региона волнения.

ВГ рассматривается как надувной корпус судна с обшивкой, движущейся по направлению вектора скорости набегающего потока. Эта схема отличается от традиционных тем, что надувной корпус подвергается большим формоизменениям на взволнованной поверхности и неровностях грунта.

Исследуются совместные перемещения вертикальные и килевые. При этом и на воде и на грунте предполагается, что неровность (волна) цилиндрична и образующая поверхности препятствия перпендикулярна курсу. Препятствие попадает под обе гусеницы симметрично диаметральной плоскости.

Обнаруженное расчетом мощное демпфирование вертикальной качки подтверждено экспериментом, что обосновывает прогноз столь же мощного гашения качки бортовой. Ускорения при наезде на выступ или ров в несколько раз меньше, чем это известно для тяжелых гусеничных машин. Выводы о высокой плавности хода подтверждены испытаниями крупномасштабной модели, что дает основание рекомендовать скорости хода на малых торогах и валунах до 30...40 км/ч.

В комплексе технических показателей ТСВГ особенно высокую оценку получает их экологичность. Предложен алгоритм выбора параметров схемы на начальных стадиях проектирования, в основе которого лежит сложившийся приоритет щадящего воздействия на грунт [3].

Интенсивная добыча нефти и газа в северных регионах России началась без надлежащего обеспечения транспортных и транспортно-технических работ вездеходами, эксплуатация которых гарантировала бы сохранность дернины грунта в летнее время. В результате использования общепромышленных образцов гусеничных и колесных тракторов и вездеходов, модернизированных образцов военной техники следами вездеходов повреждено более 15 % тундры России. Широко известны трудности восстановления дернины в условиях тундры, интенсивность протаивания и размывания колеи.

Не оправдались надежды на улучшение экологической обстановки за счет широкого применения транспортных средств на воздушной подушке. На пересеченной местности традиционный движитель – воздушный винт не обеспечивает преодоление уклона, а на боковом уклоне транспорт на воздушной подушке теряет управляемость. Множество комбинированных вездеходов предлагалось при освоении северных месторождений. Комбинация состоит в сочетании воздушной подушки как опорного устройства и колесных и гусеничных движителей как тягового устройства. На уклонах пересеченной местности движители имеют слабое прижатие к грунту и срывают дернину.

Вездеходы с широкими гусеницами при катковом опирании рвут грунт на боковых кромках гусеницы под действием концентрации нагрузок под катком. При хорошей проходимости и малом среднем давлении на грунт такие вездеходы не обеспечивают сохранность тундры.

Снижение несущей способности грунта тундры летом ставит разработчиков транспорта перед необходимостью уменьшения давления на грунт. При этом необходимо обеспечить возможно меньшие касательные напряжения в зоне контакта движителя с грунтом для сохранения от сдвига верхнего пло-

дородного слоя почвы. Институт комплексных транспортных проблем (ИКТП) при Госплане СССР в 1990 году опубликовал требования к типажам наземных амфибийных внедорожных транспортных средств, где на перспективу были определены допустимые нагрузки на грунт 18...30 кПа. При этом несущая способность переувлажненной тундры оценивалась в 10...15 кПа [4].

Разрабатываемые в Морском государственном университете им. адм. Г.И. Невельского вездеходы на воздухоопорных гусеницах при больших площадях опорной поверхности гусениц прижимают гусеницы воздушной подушкой. Такое идеально равномерное распределение давления по площади опирания не создает концентрации нагрузок свойственной катковому опиранию на гусеницу. Воздухоопорная гусеница передает нагрузки на грунт через множество пневмобаллонов с малым давлением воздуха, на периферии контактного пятна которых обеспечивается плавное снижение нагрузки без среза характерного для боковых кромок жестких гусениц.

В предварительных разработках мореходных универсальных вездеходов на воздухоопорных гусеницах их целесообразная грузоподъемность определена от 5 до 60 т. Проблема обеспечения экологичности опорно-двигательного устройства должна быть разрешена и для малых и для больших грузоподъемностей.

В проектной практике воздействие на грунт гусеничного опорно-двигательного устройства оценивается по среднему давлению. Для гусеницы воздухоопорной такая оценка может быть достоверно использована как мера экологичности гусеницы, поскольку реальное давление на грунт сходно со средним. Например, полный вес вездехода спроектированного для сейсморазведки составляет $G = 150$ кН. При ширине гусеницы 1,05 м и длине контактного пятна 7,48 м площадь опирания

$$S = 2 \cdot 1,05 \cdot 7,48 = 15,7 \text{ м}^2.$$

Давление на грунт среднее

$$P_{\text{ср}} = G/S = 150/15,7 = 9,55 \text{ кПа},$$

что несколько ниже нижнего предела несущей способности даже переувлажненной тундры.

Предпроектными исследованиями вездеходов грузоподъемностью 5 и 10 т при параметрах воздухоопорных гусениц полностью удовлетворяющих требованиям хода по воде, болоту, пескам, мелким валунам и торосам, возможностям работы в прибойной полосе, преодолевать рвы и уступы, выходить из воды на прочный лед, при обеспечении хода по тонкому льду и весеннему разрушающемуся льду, на ходу на подъем и работе на боковом уклоне пересеченной местности среднее давление на грунт не превышает 12 кПа. Это позволит при полной загрузке вездеходов работать на многих видах переувлажненной тундры без повреждения дернины.

При проявлении признаков повреждений грунта экологичность вездеходов обеспечивается в летнее время снижением грузоподъемности и соответствующим снижением избыточного давления в воздушной подушке воздухоопорной гусеницы.

Методика повышения экологичности вездеходов снижением грузоподъемности учитывалась при проектировании мореходного вездехода грузоподъемностью 20 т. Разработка проекта экспериментального образца выполнялась по нашим схемам в Московском авиационном институте. При полной нагрузке давление в гусеницах необходимо поддерживать на уровне 15 кПа. При необходимости обеспечить работоспособность на слабых грунтах снижается грузоподъемность.

Для разгрузки судов в Арктике с выходом в тундру и для работы по освоению северных месторождений выполнены оценки параметров вездеходов грузоподъемностью 60 т при давлении в гусенице 24 кПа. В предпроектной информации оговорено, что такая грузоподъемность допустима зимой, когда не возникает угрозы разрушения грунта. На летнее время, как и для известного вездехода «Ямал», грузоподъемность снижается до 40 т. Снижение избыточного давления до уровня 18...20 кПа позволяет вписываться в нормы безвредного воздействия на грунт тундры летом при приемлемой грузоподъемности для обеспечения интенсивных разгрузочных, транспортных и транспортно-технологических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азовцев А.И. Анализ возможностей применения гусеничных движителей на морских и речных судах // Труды ин-та / ДВВИМУ. Вып. 7. – Владивосток: ДВ книжн. изд-во, 1970. – С. 3–9.
2. Азовцев А.И., Самсонов С.В. Гидродинамические характеристики воздухоопорных гусениц // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1986. – № 2. – С. 172–174.
3. Азовцев А.И., Гаманов В.Ф., Луцай С.В. Возможности обеспечения щадящего воздействия на грунт тун-

дры при использовании универсальных вездеходов на воздухоопорных гусеницах // Сб. матер. I Евро-Тихоокеанского конгресса, Владивосток, 2003.

4. Чеботаев А.А., Мельник А.Д. Безвредные транспортные средства для Севера // Научно-технический прогресс и перспективы развития новых специализированных видов транспорта: Матер. Всес. научно-практ. конф. – 23-26 окт. 1990. – Ч. 2. – М.: ВНИИПК техоргнефтегазстроя, 1990. – С. 115–125.

УДК 539.621+674.05

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ РАБОЧЕГО ДВИЖЕНИЯ В МЕХАНИЗМАХ РЕЗАНИЯ ЛЕНТОЧНОПИЛЬНЫХ СТАНКОВ

А.А. Кондратюк*, В.К. Шилько**

*Томский политехнический университет. E-mail: publish@tpu.ru

**Томский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: ll@tgasa.tomsk.ru

Рассмотрены некоторые условия возникновения касательных напряжений в передаче гибкой связью «шків-ленточная пила» механизмов резания ленточнопильных станков. Получены аналитические зависимости для анализа касательных напряжений в трущейся паре «шків-ленточная пила» и формирующемся между ними «третьем теле».

Основу механизма резания ленточнопильного станка составляют два шкива с натянутой на них ленточной пилой, представляющей собой тонкую бесконечную металлическую ленту с насеченными на одной стороне режущими зубьями. Движение ленте передается от приводного шкива благодаря усилию предварительного натяжения как во многих передачах трением первого вида. Поведение механизмов резания ленточнопильных станков на холостом ходу (без пиления) укладывается в рамки классической теории передач гибкой связью. Однако в момент врезания в древесину и при дальнейшей распиловке в работу вступает гибкий рабочий орган, которым в данном случае является ленточная пила. Появляется поперечная сдвигающая нагрузка от действующих сил резания и ярко выраженная тонкая прослойка между шкивом и гибким рабочим органом (ленточной пилой) в виде спрессовавшейся и налипающей на шкивы пылеопилочной смеси. Данная прослойка выполняет роль «третьего тела», имеющего важное значение при передаче рабочего движения. Чтобы понять влияние «третьего тела» на работу передачи «шків-ленточная пила», рассмотрим некоторые процессы и явления, возникающие в механизме резания ленточнопильного станка.

Из теории передач гибкой связью следует [1], что между гибким рабочим органом и шкивом имеет место упруго-вязкий характер контакта трения. В пользу упруго-вязкого характера контакта трения свидетельствует тот факт [1, 2], что наряду с малым предварительным смещением в этих зонах контакта, (на дуге относительного покоя), имеет место значительное проскальзывание в других зонах контакта, (на дуге относительного скольжения). Это обстоятельство приводит к перераспределению касательных напряжений на контакте, то есть участки контакта, где нормальные давления меньше, в момент приложения внешней сдвигающей силы, частично проскальзывают. Сдвигающие усилия на контакте перераспределяются, уменьшаясь на проскальзывающих участках и возрастая на неподвижных участках, где нормальные давления больше [2].

Из теории передач гибкой связью и деформационной теории упругости известно [1, 3], что касательные напряжения τ зависят от максимального относительного сдвига γ_{\max} трущихся пар, в данном случае шкива и ленточной пилы, и составят

$$\tau_{\max} = \gamma_{\max} G = \frac{k \cdot W \cdot G}{c \cdot s}, \quad (1)$$

где γ_{\max} — максимальный относительный сдвиг ленточной пилы и шкива при передаче рабочего движения, $W = T_p - T_x$ — тяговое усилие, развиваемое в передаче «шків-ленточная пила», T_p — усилие натяжения в рабочей ветви, T_x — усилие натяжения в холостой ветви, G — обобщенный модуль сдвига «третьего тела», k — коэффициент, учитывающий, какая часть тяговой силы передается в пределах дуги скольжения, c — коэффициент контактной жесткости трущихся пар, s — толщина ленточной пилы.

Однако выражение (1) не позволяет учесть отдельно касательные напряжения, сформировавшиеся к моменту проскальзывания, то есть от усилия предварительного натяжения ленточной пилы T_0 и касательные напряжения, возникающие при передаче тягового усилия W .

Кроме того, максимальный относительный сдвиг γ_{\max} трущихся пар зависит от многих факторов, учесть которые можно только приближенно.

Вопросы предварительного смещения и влияния способа приложения сдвигающих сил на характер деформаций и напряжений, возникающих в упругих телах, которые передают и воспринимают сдвигающие усилия через контакт трения, разработаны недостаточно [1]. В работе [2] сформулированы основные особенности сухого трения и введено понятие о «третьем теле», формирующемся между трущимися телами и характеризующемся упруго-вязкими свойствами. Разрушение контакта идет не одновременно по всей поверхности, а обусловлено бегущей волной деформации, рвущей последовательно «мостики сварки» между трущимися телами, то есть такой процесс носит закономерный характер. Такое явление можно представить как движение «зоны проскальзывания» вдоль поверхности трения, что напоминает движение «трансляционных дефектов» в деформируемом твердом теле. Введение понятия «зоны проскальзывания» между «мостиками сварки» аналогично понятию «трансляционных дефектов» в зоне контакта [3], а движение таких дефектов вдоль зоны контакта приводит к образованию и разрушению «мостиков сварки».

Все это, с некоторыми оговорками, позволяет перенести уравнения, описывающие динамику поведения дефектов в деформируемом твердом теле, на описание вязкого поведения третьего материала, формирующегося в зоне контакта трущихся тел.

Рассмотрим характер изменения касательных напряжений в зависимости от скорости и времени деформаций при простой схеме нагружения, рис. 1. Так, возрастание силы трения в зависимости от времени контакта задается выражением [2]

$$T = T_0 [\alpha - (\alpha - 1) \cdot e^{-\beta t}],$$

где β – константа, характеризующаяся безразмерным коэффициентом упрочнения молекулярной

связи, связанная с временем релаксации, $\alpha = \frac{T_\infty}{T_0}$,

а T_0 и T_∞ – сила трения при нулевом и бесконечно большом времени.

Используем уравнение для необратимой составляющей скорости пластических деформаций e_{12} , которое имеет место для деформируемого твердого тела [4]

$$B \frac{\partial e_{12}}{\partial t} + \eta \cdot e_{12} - \tau_{12} = 0, \quad (2)$$

где e_{12} – скорость пластических деформаций в «третьем теле», которая характеризует необратимые смещения трущихся тел относительно друг друга, η – коэффициент вязкости, τ_{12} – внешние касательные напряжения, равномерно распределенные вдоль поверхности, B – константа, характеризующая граничные свойства трущихся тел. В данном случае она характеризует плотность «третьего тела».

Как следует из работ [1, 4], константы в уравнении (2) зависят в первую очередь от состояния поверхности, давления и температуры.

Решение однородного уравнения, соответствующего уравнению (2), имеет вид

$$e_{12} = C_1 \cdot e^{-\frac{\eta}{B} t}, \quad (3)$$

где величина $\frac{\eta}{B} = \beta$ характеризует время релаксации.

Подставим значение скорости (3) в уравнение (2) и из выражения

$$B \left\{ C_1 \cdot e^{-\frac{\eta}{B} t} - \frac{\eta}{B} \cdot C_2 \cdot e^{-\frac{\eta}{B} t} \right\} + \eta \cdot C_2 \cdot e^{-\frac{\eta}{B} t} - \tau_{12} = 0$$

находим постоянные компоненты $C_1 = \frac{\tau_{12}}{B} \cdot e^{\frac{\eta}{B} t}$ и

$$C_2 = \frac{\tau_{12}}{\eta} \cdot e^{\frac{\eta}{B} t} + C_0.$$

Отсюда окончательно имеем

$$e_{12} = \frac{\tau_{12}}{\eta} + C_0 \cdot e^{-\frac{\eta}{B} t}.$$

«Вязкие» касательные напряжения, возникающие в зоне контакта, имеют вид

$$\tau = \tau_{12} + \eta \cdot C_0 \cdot e^{-\frac{\eta}{B} t}. \quad (4)$$

Для определения постоянной компоненты C_0 возьмем в выражении (4) начальные условия в виде $\tau_0 = \tau$ при $t = 0$.

Отсюда получим, что в начальный момент имеют место некоторые напряжения трения

$$\tau_0 = \tau_{12} + \eta \cdot C_0 = 0, \text{ откуда } C_0 = \frac{\tau_0 - \tau_{12}}{\eta}.$$

Общие касательные напряжения в зоне трения тел составят

$$\tau = \tau_{12} + (\tau_0 - \tau_{12}) \cdot e^{-\frac{\eta}{B} t},$$

или

$$\tau = \tau_0 \left[\frac{\tau_{12}}{\tau_0} - \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_0} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{\eta}{B} t} \right].$$

Принимая $\alpha = \frac{T_\infty}{T_0} \approx \frac{\tau_{12}}{\tau_0}$, окончательно имеем:

$$\tau = \tau_0 [\alpha - (\alpha - 1) \cdot e^{-\beta t}], \quad (5)$$

где τ_0 – можно трактовать как чисто упругие (жесткие) касательные напряжения, сформировавшиеся к моменту проскальзывания при $t = 0$.

Данные условия характера передачи рабочего движения в механизме резания ленточнопильного станка рассмотрены в предположении, что другие компоненты тензора скорости пластических деформаций не оказывают влияния на сдвиговую компоненту скорости деформации e_{12} в простой схеме нагружения, рис. 1.

Характер изменения касательных напряжений между трущимися телами в передаче «шків-ленточная пила», вытекающий из выражения (5), представлен на рис. 2. Из него видно, что, в зависимости от функции времени с момента начала движения, изменение упругих касательных напряжений на эле-

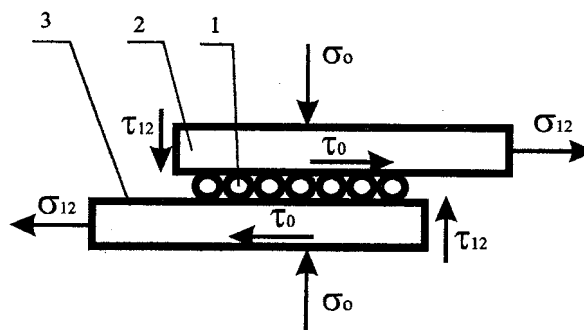


Рис. 1. Схема нагружения при передаче движения в трущейся паре «шків-ленточная пила», 1) пылеопилочная прослойка, 2) ленточная пила, 3) ведущий шків ленточнопильного станка, σ_0 ; τ_0 – нормальные и касательные напряжения в трущейся паре, формирующиеся от усилия предварительного натяжения T_0 ; σ_{12} ; τ_{12} – нормальные и касательные напряжения в трущейся паре, формирующиеся от приложения тягового усилия W

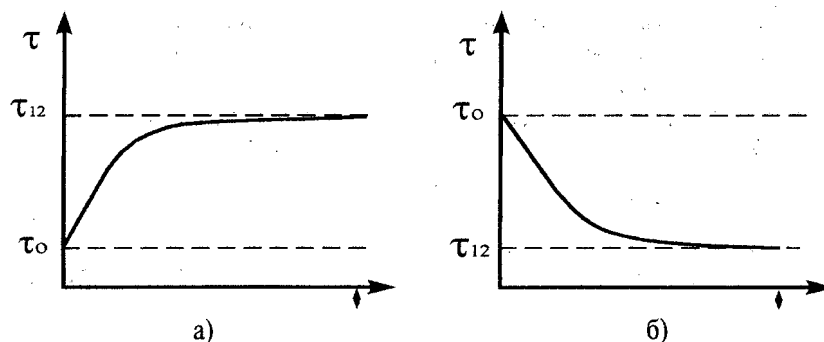


Рис. 2. Характер изменения упругих касательных напряжений, сформировавшихся к моменту проскальзывания: а) до проскальзывания, б) после проскальзывания

ментарном участке до проскальзывания идет со значительным возрастанием, а после проскальзывания с резким убыванием. Это напоминает график изменения сил трения в пределах дуги обхвата для передач гибкой связью и характер изменения сил трения покоя в момент предварительного смещения трущихся тел. Однако, в отличие от трущихся пар, находившихся в состоянии покоя, наши трущиеся тела изначально испытывают действие постоянных начальных касательных напряжений, которые в процессе работы (от передачи тягового усилия) могут уменьшаться относительно номинальных значений. Это значит, что по касательным напряжениям наш гибкий рабочий орган, в данном случае ленточная пила, будет испытывать знакопеременные нагрузки, а не нагружение по «отнулевому» циклу, как считалось ранее. Характер изменения упругих касательных напряжений остается неизменным для различных уровней напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.В. Передача трением. — М.: Машиностроение, 1978. — 176 с.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.

Выводы

1. В начальный момент движения трущихся пар передачи «шків-ленточная пила», имеют место некоторые касательные напряжения трения от усилия предварительного натяжения, которые носят упруго-вязкий характер. Затем сдвигающие усилия на контакте перераспределяются, возрастая на неподвижных участках и уменьшаясь на проскальзывающих участках, где нормальные давления меньше.

2. В момент проскальзывания с некоторой нулевой отметки времени к начальным касательным напряжениям трения добавляются дополнительные касательные напряжения, формирующие «зону проскальзывания» и играющие основную роль при передаче главного рабочего движения.

3. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1976. — 608 с.
4. Гриняев Ю.В., Чертова Н.В. Полевая теория дефектов. Часть 1 // Физическая мезомеханика. — 2000. — Т. 3. — № 5. — С. 19–32.