

Рисунок 5 – Эпюры распределения эффективной пластической деформации материала по глубине поверхностного слоя для условий резания ( $\alpha = 10^\circ$ ): а –  $\gamma = 0^\circ$  ( $v = 60$  м/мин,  $a = 150$  нм,  $\rho = 50$  нм); б –  $v = 60$  м/мин; в –  $v = 10$  м/мин, ( $\gamma = 10^\circ$ ,  $a = 150$  нм,  $\rho = 50$  нм); г –  $v = 180$  м/мин,  $\rho = 50$  нм; д –  $v = 60$  м/мин,  $\rho = 10$  нм ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $a = 150$  нм.); е –  $a = 50$  нм; ж –  $a = 150$  нм; з –  $a = 250$  нм ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $v = 60$  м/мин,  $\rho = 150$  нм)  
 Наиболее интенсивной деформации подвергается слой заготовки толщиной 0,2–0,27 мкм, что соответствует 1,3–1,7 толщины среза.

237

Наибольшее влияние на данный параметр оказывает острота кромки режущего инструмента – деформации в поверхностном слое изделия возрастают от 0,68 ( $\rho = 50$  нм) до  $\epsilon = 1$  при величине  $\rho = 150$  нм.

Рост толщины среза также приводит к упрочнению обработанной поверхности, но степень влияния этого параметра менее интенсивна – с ее ростом в 5 раз, величина  $\epsilon$  возрастает в 1,2 раза. Степень пластической деформации в зависимости от переднего угла реза составляет от 0,76 для реза  $\gamma = -10^\circ$  до 0,4 при точении инструментом с передним углом  $\gamma = 10^\circ$ .

Известно [5], что в процессах обработки цветных металлов алмазным лезвийным инструментом температурой резания относительно низка и находится в диапазоне 60–70 °С, тем не менее, зависимость механических свойств обрабатываемого материала от температуры обуславливает влияние скорости резания на параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя. Рост скорости резания от 60 до 180 м/мин является причиной заметного (от  $\epsilon = 0,68$  до  $\epsilon = 0,4$ ) снижения величины пластической деформации материала упруго-пластически отгесняемого под заднюю поверхность инструмента. При этом наиболее интенсивное снижение данного параметра наблюдается с ростом скорости резания от 120 до 180 м/мин.

Влияние различных факторов процесса алмазного микроточения на степень деформации обработанной поверхности показано на рис. 6, их ранжирование по уровню влияния – на рис. 7.

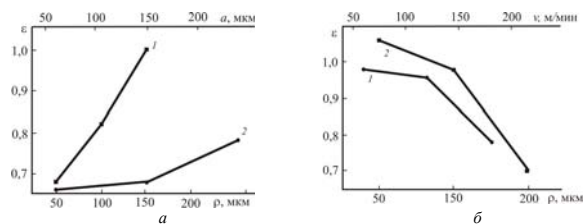


Рисунок 6 – Расчетные зависимости эффективной пластической деформации поверхностного слоя материала от параметров обработки: а – радиуса округления режущей кромки (1) и толщины среза (2); б – скорости резания (1) и переднего угла инструмента (2)

**Выводы.** Деформация материала поверхностного слоя изделий из алюминиевого сплава при алмазном микроточении определяется условиями обработки (режимами резания, геометрическими параметрами реза), достигая большой величины (до  $\epsilon \sim 1$ ).

238

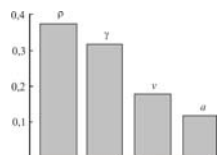


Рисунок 7 – Уровень влияния параметров обработки на степень деформации поверхностного слоя обработанных изделий

Процесс формирования поверхностного слоя обработанных изделий определяется явлениями, протекающими в зоне контакта передней поверхности и режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом. Толщина среза, радиус округления режущей кромки и передний угол реза обуславливают характер напряженно-деформированного состояния в зоне первичных деформаций, что в свою очередь определяет объем зоны, охваченной деформациями.

Повышение качества изделий металлооптики связано с формированием в их поверхностном слое зоны повышенной твердости, обеспечивающей при прочих равных условиях повышение отражательной способности обработанных поверхностей [6]. В этой связи, данные о влиянии условий алмазного микроточения на эффективную пластическую деформацию, полученных в ходе компьютерного моделирования процесса алмазного микроточения, дают возможность определить режимы обработки, способствующие повышению эксплуатационных характеристик оптических изделий: – для обеспечения эффективной деформации материала величиной 0,6–1,0 обработка должна производиться при скоростях резания 60–120 м/мин резцом с передним углом  $0^\circ$ , радиусом округления режущей кромки 100–150 нм; – толщина среза оказывает незначительное влияние на упрочнение обработанной поверхности, и в этой связи, ее величина должна определяться подачей, назначаемой из условия получения требуемой шероховатости обработанной поверхности.

**Список использованных источников:** 1. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05. 03. 01 / Д. В. Криворучко; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2010. – 37 с.; 2. Криворучко Д. В. Основи 3D – моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д. В. Криворучко, В. О. Залого, В. Г. Корбан. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 209 с.; 3. Колмогоров В. Л. Напряженне, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров. – Л.: Металлургия, 1970. – 229 с.; 4. Sathyan Subbiah, Shreyes N. Melkote. Effect of finite edge radius on ductile fracture ahead of the cutting tool edge in micro-cutting of Al2024-T3 // Sathyan Subbiah, Shreyes N. Melkote. // Materials Science and Engineering A 474 (2008) 283–300.; 5. Грубый С. В. Развитие метода алмазного микроточения на сверхточных станках для обработки отражающих поверхностей металлооптики // Технология металлов. – 1999. – №5. – С. 26–30.; 6. Технологическое управление отражательной способностью поверхностей деталей металлооптики алмазным микроточением / С.А. Клименко, М.Ю. Колейкина, А.С. Манюхин и др. // Инженерия поверхности и реновация изделий: Мат. 12-й междунар. науч.-техн. конф., 4-8 июня 2012 г., г. Ялта. – К.: АТМ Украины, 2012. – С. 107–109.

Поступила в редакцию 15.04.2012

239

УДК 621.91

М.Ш. Мигранов, д-р техн. наук, Уфа, Россия

### ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ИОННОДИФИЦИРОВАННЫМ СЛОЕМ И ИЗНОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ

Наведено результати експериментальних досліджень трибологічних властивостей різального інструменту з покриттями.

Приведены результаты экспериментальных исследований трибологических свойств режущего инструмента с покрытиями.

The results of experimental studies of the tribological properties of coated cutting tools.

Технология улучшения свойств поверхности сравнительно недавно стало основным способом повышения износостойкости режущих инструментов и производительности лезвийной обработки резанием. Известно [1] несколько способов улучшения свойств: первый (и наиболее часто применяемый) – это разработка передовых составов покрытий для физического осаждения покрытий (ФОП) и второй – это предварительная обработка поверхности подложки. Применение износостойких покрытий для инструментов из быстрорежущей стали не могут гарантировать оптимальный результат без специальной обработки слоя подложки до нанесения твердого покрытия. Такая обработка поверхности обеспечивает эффект упрочнения подложки из быстрорежущей стали.

Одним из наиболее эффективных методов модификации поверхности режущих инструментов из быстрорежущей стали является обработка поверхности потоком ионов. Наиболее широко используемый метод такого типа обработки – ионное азотирование. Этот метод позволяет при резании повысить износостойкость инструментов из быстрорежущей стали в 1,3 – 1,5 раза. В то же самое время, азотированная подложка значительно (в 1,5 раза) повышает износостойкость инструмента с покрытиями после ФОП благодаря упомянутому выше эффекту. «Двойная» обработка поверхности, сочетающая в себе азотирование и нанесение твердого покрытия, перспективна к широкому использованию особенно для режущих инструментов из быстрорежущей стали. Именно такие технологические покрытия поверхности рассматривались как основные в данном исследовании.

Одним из способов улучшения режущих свойств инструментов является разработка нового вида многослойных покрытий, которые сочетали бы в себе повышенную износостойкость и антифрикционные свойства. Такие покрытия появились сравнительно недавно. Причина интереса к таким покрытиям объяснима. Известно, что высокая износостойкость инструментов с твердым по-

240

крытием определяется тем, что они функционируют в качестве экрана для контактирующих поверхностей инструмента, тем самым защищая их от внешнего воздействия при резании. В основном это происходит во время стационарной стадии износа (нормального износа). Однако, неизбежный износ покрытия приводит в дальнейшем к воздействию на базовый материал инструмента, фрикционные свойства которого значительно хуже свойств покрытия. В результате этого износ инструмента быстро вступает в свою катастрофическую фазу. Продление стадии нормального трения, однако, вполне осуществимо. Это достигается в многослойных покрытиях нанесением дополнительного нижнего слоя на поверхность основы инструмента. Этот слой должен сочетать в себе свойства и способности создавать защитные вторичные структуры в межфазовом слое покрытия и подложки.

Одним из способов создания таких слоев является ионная модификация (легирующие или смешивание) поверхности инструмента.

Целью данной работы является исследование влияния антифрикционного состава подложки на трибологические свойства режущего инструмента с такого рода покрытиями и определить наилучшую основу для разработки многослойных покрытий с программируемым изменением свойств, обеспечивающих для каждого слоя покрытия выполнение функции износостойкости на соответствующей стадии износа.

В данной работе мы исследовали многослойные триплексные покрытия. Покрытие было нанесено с помощью трех устройств. Используемая в качестве основы быстрорежущая сталь была предварительно азотирована в тлеющем разряде. Затем поверхность инструмента была модифицирована добавлением ионов до нанесения твердого покрытия. Наконец, модифицированный слой (Ti, Cr)N был покрыт с помощью ФОП - метода.

Ионное азотирование подложки из быстрорежущей стали производилось в специальном устройстве для ионного азотирования в сочетании с нагреванием. Технологические параметры были следующие: плотность тока в тлеющем разряде - 3 А/м<sup>2</sup>; время азотирования - 0,5 ч; давление газа - 266 Па; состав газа - 25%(N<sub>2</sub>) + 75% (H<sub>2</sub>) (диссоциированный аммиак); температура - 500°C.

Твердое покрытие наносилось плазмой с дуговым разрядом катода (САРДР). Параметры нанесения покрытия: давление газа (азот) - 3 x 10<sup>-1</sup> Па; ток в дуге - 100 А; напряжение смещения - 200 В; фокусирующий ток в катушке - 0,2 А; температура при нанесении покрытия - 500°C.

Поверхностный слой очищался до имплантации специальной небольшой по времени обработкой в тлеющем разряде для улучшения адгезии ФОП - покрытия с подложкой. До нанесения ФОП - покрытия каждый из образцов был имплантирован ионами одного из шестнадцати различных элементов с помощью высокоэнергетического ионного имплантатора с энергией приблизительно в 60 кэВ при комнатной температуре. Типично используемые дозы

составляли 4 x 10<sup>17</sup> ионов на см<sup>2</sup>. До ионной имплантации исследуемых элементов было проведено травление поверхности ионами аргона. Чтобы снизить загрязнение поверхности использовалась охлаждаемая ловушка для поддержания низкого фонового давления в ~ 2x10<sup>-6</sup> мм.рт.ст. Основой инструментального материала была быстрорежущая сталь Р6М5.

Концентрация атомов имплантируемых элементов в поверхностном слое образцов определялась с помощью рентгеновского микроанализа на сканирующем электронном микроскопе JSM - U3, оборудованном спектрометром на двух кристаллах для рассеивания волн. Эти концентрации составили около 1,0 - 1,5 атомных %.

Химический состав вторичных фаз, появляющихся на поверхности инструмента при резании, исследовался с помощью ВИМС - спектрометрии вторичной массы ионов. Это исследование было выполнено на электронном спектрометре ESCALAB MK2 (VG), оборудованном ионным анализатором SQ 300 квадрупольного типа и сканирующим ионным распылителем AG-61, который позволяет фокусировать поток первичных ионов аргона с энергией до 5 кэВ на участке диаметром до 0,5 мкм на поверхности образца. Скорость ионного травления была порядка 0,2 монослоя в мин, анализ выполнялся в статическом режиме. Исследовался средний химический состав зоны износа покрытия и образовавшихся пленок.

Для ионной модификации на поверхности использовались шестнадцать химических элементов, заранее выбранных для этой работы. Эти элементы можно сгруппировать следующим образом:

1. Элементы (газы) с высокой способностью к окислению, создающие устойчивые динамические защитные поверхностные пленки при трении, например - O, N, J и Cl;
2. Неметаллы (B, C, Si), способные создавать соединения с высокими техническими свойствами при взаимодействии с основными материалами и окружающими элементами;
3. Металлы, включая:
  - 3.1 Металлы с низкой точкой плавления (в частности, In, Mg, Sn, Ga), используемые как смазки или антифрикционные материалы;
  - 3.2 Родственные металлы с шестигуольной решеткой и антифрикционными свойствами;
  - 3.3 Металлы (Al, Cr), способные образовывать окисеподобные пленки, устойчивые при резании, с хорошими антифрикционными свойствами и низким коэффициентом теплопроводности;
  - 3.4 Металлы с низким коэффициентом трения при контактировании с обрабатываемыми материалами (сталью, никелевыми и титановыми сплавами), например, Ag и Cu.

Выбирая металлические материалы, мы принимали во внимание известные исследования по трибологической совместимости контактирующих элементов. Для ионной имплантации были выбраны химические элементы с

наименьшей совместимостью в трибопарах с железом, никелем и титаном, т.е. с металлами, входящими в состав обрабатываемых материалов: низколегированных, теплоустойчивых и некоррозионных сталей, а также титановых и никелевых сплавов, широко используемых в деталях машин. Более того, азотированная поверхность инструмента подвергалась ионному смешиванию с четырьмя типами антифрикционных сплавов, часто используемых для улучшения условий трения скольжения: сплава на основе цинка Zn + Al(9%) + Cu(2%); сплава на основе Cu + Pb(12%) + Sn(8%); сплава на основе свинца Pb + Sn(1%) + Cu(3%) и сплава на основе алюминия Al + Sn(20%) + Cu(1%) + Si(0,5%).

Износ четырехгранных быстросменных пластин из быстрорежущей стали с многослойными покрытиями исследовался при точении стали 40X со скоростью резания - 270 м/мин, глубина резания - 0,5 мм, подача - 0,11 мм/об. Резание проводилось как с охлаждающей жидкостью, так и без нее. Влияние ионной модификации поверхности на износостойкость резцов было оценено путем сравнения периодов стойкости инструментов с предложенными многослойными покрытиями инструментов с поверхностными технологическим покрытиями без дополнительной ионной модификации. Коэффициент износостойкости инструмента был определен как отношение времени, необходимого для резания до соответствующего технического условиям значения износа инструмента с многослойным покрытием, к времени, необходимого для резания инструментом с поверхностным технологическим покрытием (Ti,Cr)N + ионное азотирование). Не менее 8 испытаний по резанию были проведены для каждого вида поверхностной модификации (исследовались по две пластины). Разброс измерений износостойкости составил 10%.

Коэффициенты трения были определены с помощью адгезиомера особой конструкции [2]. На этом адгезиомере вращающийся индентор с исследуемыми покрытиями был помещен между двумя полированными образцами, изготовленными из обрабатываемого материала (сталь 40X). Чтобы смоделировать условия трения, аналогичные процессу резания, образцы и индентор нагревались электродатным способом в диапазоне температур от 150° до 550°C. Сжимающая образцы сила равнялась 2400 Н, это создавало пластическую деформацию в зоне контакта. Для оценки антифрикционных свойств слоя мы использовали адгезионный компонент коэффициента трения. Этот компонент важен для оценки и прогнозирования интенсивности износа при трении металлов. Он определялся как отношение сопротивления сдвигу  $\tau_{ms}$  вызываемому адгезионным взаимодействием между материалами инструмента и обрабатываемой деталью, к нормальному напряжению  $P_{ms}$ , возникающему на пластическом контакте при температурах испытания ( $\tau_{ms}/P_{ms}$ ).

Как можно видеть, ионная модификация поверхности резца значительно влияет на его износостойкость. Эти результаты не противоречат данным других исследований. По нашему мнению, на повышение износостойкости резца оказывает влияние комплексное сочетание многочисленных взаимосвязанных факторов. Сюда относятся факторы, которые дают возможность:

Износостойкость резцов с модифицированным поверхностным слоем (ионная имплантация)

Группа	Материал	Состав элементов	Коэффициент адгезии к подложке с модификацией	Коэффициент износостойкости при резании	
				без СОЖ	с СОЖ
Поверхности, модифицированные ионной имплантацией					
1	Элементы с высокой степенью окисления	O	0,25	0,9	1,25
		N	0,41	2,0	1,83
		I	0,7 - 0,8	3,2	0,7
		Cl	-	1,8	-
2	Неметаллы	B	0,6	1,2	0,65
		C	0,6	1,7	0,83
		Si	-	0,7	0,6
3	Металлы				
A)	Легкоплавкие	In	0,6	2,4	2,1
		Mg	0,25	3,0	0,08
		Sn	0,6	0,8	0,7
		Ga	-	2,0	-
Б)	С шестигуольной решеткой	Co	0,5	1,8	0,13
B)	Образующие устойчивые окисы	Al	0,4	0,15	1,3
		Cr	0,6	0,2	1,2
Г)	С низким коэффициентом трения	Cu	0,55	1,0	2,5
		Ag	0,4	3,1	2,7
Поверхности, модифицированные антифрикционными сплавами (ионная имплантация)					
4	Zn - Al - Cu 9 - 1,5 ГОСТ 21437 - 75	Zn + Al(9%) + Cu(2%)	0,44	1,98	-
		Cu + Pb(11%) + Sn(9%)	0,4	0,95	-
		Pb + Sn(1,5%)	0,35	0,6	-
		Al - Sn - Cu AO20 - 1 ГОСТ 14113 - 69	0,3	0,4	-

Данные таблицы показывают, что имплантация антифрикционных сплавов, что широко используется для улучшения условий трения скольжения [3], позволяет повышать износостойкость резца, не более чем в 2 раза. Такой способ повышения износостойкости резца, снижение сопротивления сдвигу адгезионных связей, появляющихся между инструментом и деталью, по-

видимому, не является самым эффективным для многослойного исследуемого покрытия. Для почти всех исследуемых антифрикционных сплавов адгезия покрытия с модифицированной поверхностью была довольно низкой. Это препятствует их практическому применению по технологическим причинам (из-за возможности отрыва от поверхности инструмента).

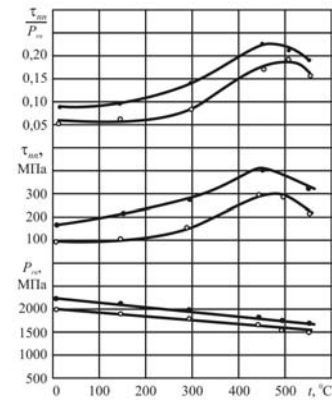
Имплантирование химических элементов позволяет получать лучшие результаты. Такие элементы, как индий, серебро и азот, повышают износостойкость инструмента в 2-3 раза (см. табл.1) при различных условиях резания (с охлаждающей жидкостью и без нее). Полученные результаты можно рассматривать как нормальные. Индий и серебро, наименее взаимодействующие с железом, их можно использовать как смазывающие вещества при обработке металлов. Они способствуют образованию измельченной стружки на резце с таким покрытием. Ионная модификация поверхности резца с другими исследуемыми элементами дает неустойчивый или негативный эффект, т.е. снижение износостойкости инструмента и невозможность обеспечения высокой адгезии между твердым покрытием и основанием.

С нашей точки зрения, наиболее предпочтительным, что касается комплекса свойств, является покрытие с имплантированным слоем индия, что дает возможность повысить износостойкость инструмента максимально, независимо, используется ли он с охлаждающей жидкостью или без нее (табл.). В тоже самое время, адгезия между покрытием и основным слоем, модифицированным индием, также достаточно высока, это подтверждает надежность покрытия в целом.

Исследование зависимости коэффициента трения от температуры для образцов с модифицированной поверхностью показали, что индий (In) улучшает фрикционные свойства быстрорежущей стали (рис.). Действуя как смазочное вещество, In снижает сопротивление сдвигу  $\tau_{\text{пл}}$  адгезионных связей, возникших в трибопарах.

Этого, однако, недостаточно для объяснения износостойкости резцов с поверхностью, модифицированной индием, в 2 и более раза. Как показал спектрометрический анализ массы зоны износа, влияние индия более сложное. Кроме индия в массе металла, в зоне износа обнаружено присутствие окиси индия, возникшей в результате разложения как индия, так и нитрида индия при нагревании во время трения.

Следовательно, оптимизируя технологию имплантации и смешивания ионов в дополнительном слое можно увеличить позитивное влияние ионной модификации на износ инструмента. Исследования показали целесообразность сочетания ионной имплантации и ФОП – обработки в пределах технологического цикла одного многоцелевого устройства для нанесения покрытий.



Влияние температуры при испытании на фрикционные свойства режущих инструментов из быстрорежущей стали с модифицированной поверхностью: ● – ионное азотирование P6M5; ○ – ионное азотирование P6M5 + имплантация In

Положительное влияние ионной имплантации In на износостойкость инструмента можно объяснить сложными процессами. Действуя как жидкая фаза при температурах резания, индий способствует уменьшению коэффициента трения. Кроме того, когда резец нагревается при трении, образующиеся на поверхности износа кислородосодержащие фазы индия защищают инструмент, препятствуя переходу от нормального к катастрофическому износу. Это позволяет увеличить стадию нормального износа и значительно повысить износостойкость инструмента.

**Список использованных источников:** 1. Верецака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с. 2. Шустер Л.Ш., Мисранов М.Ш. Прибор для исследования адгезионного взаимодействия. Патент на полезную модель № 34249 от 24.06.2003 г. 3. Шустер Л.Ш., Крюни Н.К., Шолом В.Ю., Мисранов М.Ш. Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.

Поступила в редакцию 15.06.2012

УДК 621.835

Мовшович А.Я., Ищенко Г.И., Черная Ю.А., Бондарь О.В., Харьков, Украина

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАЗОВЫХ ПЛИТ УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ СВАРОЧНЫХ РАБОТ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ИХ ОПИРАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ**

*Розглянуті питання впливу конструктивно-технологічних параметрів базових плит на їх деформований стан. Встановлені раціональні умови опирання і закріплення базових плит при різних схемах вантаження, що забезпечують мінімальну величину нормальній і тангенціальній напруженні і деформації базових плит.*

*Rассмотрены вопросы влияния конструктивно-технологических параметров базовых плит на их деформированное состояние. Установлены рациональные условия опирания и закрепления базовых плит при различных схемах нагружения, обеспечивающие минимальную величину нормальных и тангенциальных напряжений и деформаций базовых плит.*

*The questions of influence of structurally-technological parameters of base flags are considered on their deformed state. The rational terms of leaning and fixing of base flags are set at different charts loadings providing the minimum size of normal and tangential tensions and deformations of base flags.*

**Состояние вопроса.**

Универсально-сборные приспособления для сборочно-сварочных работ (УСПС) являются сравнительно новым и эффективным средством технологического оснащения, позволяющее в двое уменьшить затраты на изготовление приспособлений для сварочного производства.

Базовые плиты для УСПС являются основанием для размещения элементов универсально-сборных приспособлений, и в процессе работы воспринимают все рабочие нагрузки. От их прочности и жесткости зависит качество сборочно-сварочных работ.

В результате анализа (с точки зрения теории упругости базовые плиты представляют собой тонкие пластины со сложной схемой нагружения и опирания) условий эксплуатации УСПС на машиностроительных предприятиях установлено, что нагружение базовых плит осуществляется под действием двух или четырех изгибающих моментов, опирание и закрепление при этом имеет место в 4-х, 6-ти и 9-ти точках.

**Методика исследования.**

Исследование напряженно-деформированного состояния базовых плит УСПС выполнялось с применением метода конечных элементов (МКЭ). С позиции конструктивной прочности рассматриваемая задача является двухмерной и относится к первой основной задаче теории упругости.

Исходными предпосылками при постановке настоящей задачи являлись следующие материалы:

- материал пластины считался изотропным и однородным;

- связь между компонентами напряжений и деформаций выражалась законам Гука;
- массовыми и инерционными силами пренебрегали.

При расчете изгиба пластин по методу конечных элементов принимались те же гипотезы, что и в классической теории изгиба пластин. Исследуемая область базовой плиты разбивалась на 64 прямоугольных элемента, в каждом из которых определялись средние значения компонентов напряжений и эквивалентное напряжение, вычисленное по гипотезе удельной потенциальной энергии формоизменения (четвертая теория прочности). В узлах элементов определялись перемещения в направлении оси Z и два угла поворота вокруг оси X к Y (рис.1). При этом были исследованы различные варианты конструктивных и технологических параметров базовых плит УСПС, приведенные в табл.1.

Условия закрепления пластины принимались таковыми, что перемещения по оси Z и углы поворота относительно осей X и Y в точках закрепления, считались равными нулю.

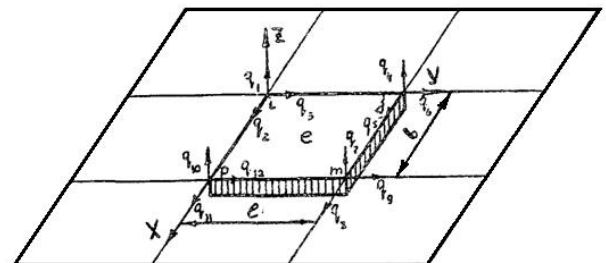


Рисунок 1 – Прямоугольный конечный элемент пластинки при изгибе

Для численной реализации поставленной задачи была разработана программа на алгоритмическом языке ПЛИ в системе ДОС/ЕС. Расчеты проводились на ЭВМ ЕС - 1022.

**Результаты исследования.**

Полученные результаты машинного счета были систематизированы, проанализированы и представлены в виде эпюр и графиков, характеризующих напряженно-деформированное состояние базовых плит УСПС и влияние на него различных конструктивных и технологических параметров.

Анализ эпюр приведенных напряжений (σпр) показывает, что наиболее нагруженной зоной базовых плит является область приложения изгибающих