

Рисунок 3 – Зависимость орошаемой площади от расхода воды, для оросителя СВН-10

Сформированы таблицы с данными об интенсивностях оросителей, которые были рассчитаны с помощью процентного содержания расхода воды на защищаемой площади с соответствующим радиусом (рисунок 3). На основе таблиц с данными об интенсивностях разработаны таблицы для оптимального распо-

ложения оросителей, которые можно использовать, если интенсивность орошения будет обеспечиваться при одновременной работе четырёх оросителей.

### Литература

1. Пожарная автоматика зданий и сооружений. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.02-317-2018 (33020). – Введ. 01.09.2018.
2. Стационарные системы пожаротушения: автоматические спринклерные установки пожаротушения. Проектирование, монтаж и техническое обслуживание: ТКП EN 12845:2015. – Введ. 01.06.2018. – Минск. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2018.
3. Стационарные системы пожаротушения: автоматические спринклерные установки пожаротушения. Проектирование, монтаж и техническое обслуживание: EN 12845:2015. – Британия, 2015.

УДК 620.178

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВАНИИ ЗАКОНА МЕЙЕРА Крень А.П.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Существующие методики определения показателя деформационного упрочнения  $n$  для металлов предполагают проведение большого числа разрушающих испытаний образцов на разрывных машинах. Такой подход не всегда применим на практике, особенно при проведении технического диагностирования потенциально опасного оборудования, отработавшего назначенный ресурс. В этой связи, в работе была поставлена задача разработать методику неразрушающего контроля  $n$  с использованием данных динамического микроударного деформирования материалов – индентирования.

Развитые теоретические основы позволили предложить следующие способы определения  $n$  на основании закона Мейера [1]:

1) с применением экспериментальной зависимости диаметра контактного отпечатка от нагружающего усилия  $P$ ;

2) дифференциальный способ определения  $n$  в каждой точке кривой нагружения.

Закон Мейера получен для случая вдавливания сферического индентора диаметром  $D$  в испытываемый материал и записывается в виде:

$$P = ad_c^m, \quad (1)$$

где  $a$  – постоянный коэффициент, зависящий от  $D$  и механических характеристик контролируемого материала,  $d_c$  – диаметр проекции пластического (контактного отпечатка), определяемый оптическим путем или расчетом,  $m$  – индекс Мейера,

который связан с показателем деформационного упрочнения  $n$  зависимостью:

$$m = n + 2 \quad (2)$$

Для определения  $n$ , прологарифмируем уравнение (1) и с учетом (2) получим:

$$\lg(P) = \lg(a) + (n + 2) \cdot \lg(d_c) \quad (3)$$

Расчет  $n$  в данном случае можно выполнить после проведения нескольких внедрений индентора с различной величиной нагрузки  $P$  и измерения соответствующих значений  $d_c$  или исходя из непрерывно снимаемой диаграммы вдавливания  $P = f(h)$ . В обоих случаях для этого используется значение угла наклона зависимости (3).

$$n = \frac{\Delta \lg(P_{max})}{\Delta \lg(d_c)} - 2 \quad (4)$$

Описанный способ определения  $n$  может реализовываться, как при статическом вдавливании, так и при ударном нагружении. В тоже время, для различных металлов значение  $n$  может, как оставаться постоянным (например, для алюминия и свинца), так и значительно уменьшаться (для сталей) при увеличении скорости деформации, что характерно для ударного индентирования. Здесь также следует отметить, что закон Мейера выполняется при статических измерениях при отношении  $d_c/D \geq 0,1$ , то есть в области деформаций свыше 2%. При меньшем соотношении  $d_c/D$  (при малых деформациях) значение  $n$  достаточно резко увеличивается.

Дифференциальный способ определения показателя деформационного упрочнения в заданной точке диаграммы вдавливания очень важен при создании новых видов материалов и оценке технического состояния металла при его длительной эксплуатации. Деформационное упрочнение является сложным, структурно чувствительным процессом, зависящим от характера образования, количества и вида дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий, межузельных атомов), образующихся при пластической деформации. По характеру изменения  $n$  можно судить о плотности дефектов кристаллического строения, размере и ориентации зерен металла, развитии стадии упрочнения. Для того чтобы определить показатель упрочнения в заданной точке диаграммы вдавливания найдем производную выражения (1) и воспользуемся существующей связью  $d_c = 2\sqrt{Dh_c}$ , а также формулой (2). В результате преобразований получим:

$$n = 2\left(\frac{dP/dh_c}{P/h_c} - 1\right) \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет определить  $n$  по результатам одного измерения по величине отношения тангенсов угла наклона касательной в заданной точке диаграммы и прямой, проходящей через начало координат и ту же точку диаграммы. Если углы наклонов касательной и прямой совпадают, то  $n = 0$ , что соответствует идеально пластичному, неупрочняемому материалу. В случае если наклон касательной больше, чем тангенс угла прямой ( $n > 0$ ), то мы имеем дело с упрочнением материала, если меньше ( $n < 0$ ) – с разупрочнением. Определяя  $n$  в каждой точке кривой вдавливания, можно проследить стадии упрочнения испытуемого металла при вдавливании сферического индентора.

Экспериментальная проверка теоретических положений проводилась на цветных металлах и сталях с помощью прибора ИСУМ-1, разработанного в ИПФ НАН Беларуси (рисунок 1). Прибор позволяет осуществить измерения с предупредительной скоростью в диапазоне 0,3–3,5 м/с.



Рисунок 1 – Прибор ИСУМ-1 для динамического индентирования материалов

Результаты испытаний металлов представлены в таблице. Для сравнения в ней также приводятся сведения о показателе  $n$ , полученном при статическом индентировании на твердомере Бринелля.

Таблица – Результаты испытаний

Материал, твердость по Бринеллю	Динамическое нагружение		Статическое нагружение	
	$n$	$d_c / D$	$n$	$d_c / D$
Сталь 109НВ	0,054	0,16	0,24	0,31
		0,14		0,27
	0,15	0,10		0,23
		0,08		0,2
Сталь 27,5HRC	0,051	0,13	0,26	0,28
		0,12		0,25
	0,13	0,09		0,22
		0,07		0,18
Сталь 45,7HRC	0,16	0,12	0,27	0,21
		0,10		0,2
	0,22	0,08		0,17
		0,07		0,14
Сталь 62,3HRC	0,26	0,10	0,32	0,23
		0,09		0,21
	0,48	0,08		0,13
		0,06		0,12
Медь 58НВ	0,27	0,19	-	-
		0,17	-	-
		0,14	-	-
		0,11	-	-
Алюминий 142НВ	0,25	0,16	0,27	0,26
		0,14		0,22
		0,11		0,18

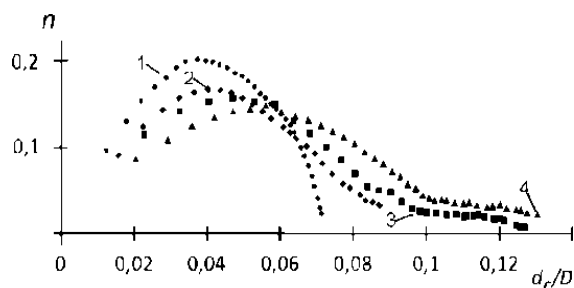


Рисунок 2 – Изменение  $n$  для стали с твердостью 27,5 HRC в зависимости от соотношения  $d_c / D$  и предупредительной скорости: 1 – 0,87; 2 – 0,72; 3 – 0,44 и 4 – 0,26 м/с

В ходе экспериментов было установлено, что на значение  $n$  оказывает влияние как скорость деформации  $\dot{\epsilon}$ , так и сама величина деформации ( $\epsilon \sim d_c / D$ ). При отношении  $d_c / D < 0,1$  в большинстве случаев наблюдается резкий рост  $n$ . Значения  $n$ , полученные при динамическом индентировании, меньше величины  $n$  для статического внедрения индентора, что объясняется влиянием скорости деформации, которая в случае ударного внедрения составляет около  $10^3 \text{ с}^{-1}$ , а при статическом не превышает  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Для сталей с высокой твердостью 45–62 HRC значения  $n$  более близки. Данный факт можно объяснить тем, что для этих материалов наблюдается преимущественно упругий характер деформирования, а пластическая деформация не достигает нужных значений для выполнения закона Мейера.

Если рассматривать изменение значения  $n$  в каждой точке процесса деформирования (формула (5)), то оно сходно (рисунок 2) по своему характеру, представленному в работе [2].

Как можно видеть на рисунке, где в качестве примера приведена такая зависимость для стали с твердостью 27,5 HRC, вначале наблюдается рост коэффициента деформационного упрочнения, а затем существенное падение. При этом для алюминия  $n$  во всех случаях практически не меняется (таблица), что также не противоречит известным данным [3] и обусловлено строением кристаллической решетки – ГЦК.

УДК 620.179.17

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ, МОЩНОСТИ И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Кулагин В.Н., Линевиц С.Я., Бусько В.Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь*

Практически любые механизмы, энергетические установки и детали электрических, тепловых, ядерных машин в электротехнике, транспортном машиностроении, в частности, электромобилестроении, быту, содержат электрические машины, например, электродвигатели постоянного или переменного тока. То есть электродвигатели относятся к объектам, определяющим эффективность производства и технический прогресс. Учитывая, что для работы электрических машин приходится до 45 % всей потребляемой электроэнергии [1], экономия энергоресурсов при их конструировании и усовершенствовании становится острее и актуальнее.

В большинстве случаев во вращающихся валах двигателей необходимо регулировать либо скорость вращения, либо крутящий момент, мощность, или КПД. Однако, как правило, регулирование скорости вращения вала или других характеристик электродвигателя приводит к росту энергозатрат, повышенному расходу материалов, внесению в схему управления дополнительных силовых или электронных элементов, что приводит к повышенному расходу энергетических и материальных затрат. Так, в [2–4] приведены различные способы, методики и схемы устройств для регулирования частоты вращения вала электродвигателя на основе усложнения конструкций электродвигателя. Поэтому главной задачей при создании новых высокоэффективных электрических машин является повышение энергоэффективности за счет снижения общих потерь (электроэнергии, материалоемкости, себестоимости и массогабаритов).

Целью настоящей работы является разработка методики и конструкции устройства, изготовление и испытание макета устройства для регулирования частоты вращения вала, мощности или

## Литература

1. Tabor, D. The Hardness of Metals. Oxford University Press, 2000. 175 p.
2. Krokha, V.A. Relationship of the strain-hardening exponent to the degree of strain and fulfillment of the exponential rule of hardening // Strength of materials Volume 13, Is. 8, 1981, p. 1022–1027.
3. Mok, C.H. The dynamic stress-strain relation of metals as determined from impact tests with a hard ball // Int. J. Mech. Sci. Pergamon Press Ltd. 1965. Vol. 7, pp. 355–371.

крутящего момента электродвигателя без дополнительных энергозатрат.

Возможность регулирования скорости вращения вала электродвигателя основана на том, что предлагаемое устройство содержит корпус; внутри вращающегося статора, выполненного относительно корпуса двигателя подвижным, расположен вращающийся в том же направлении ротор, соединенный с первым зубчатым передаточным механизмом с регулируемым передаточным отношением, который последовательно соединен со вторым зубчатым передаточным механизмом с регулируемым передаточным отношением механически связанным с первым зубчатым передаточным механизмом, образуя между ротором и статором положительную обратную связь (ПОС). Эффект повышения мощности и крутящего момента с ПОС достигается благодаря наличию прямой механической связи между ротором и статором, обеспечивающей сложение собственных скоростей вращения ротора и статора и осуществляемой с помощью двух передаточных зубчатых механизмов. Такое соединение позволяет управлять скоростью, мощностью и крутящим моментом электродвигателя без дополнительных материальных и энергетических затрат.

На рисунке 1 представлена структурная схема устройства. Регулирование частоты вращения вала, мощности или крутящего момента основано на том, что при включении устройства, размещенного в корпусе 1, вращение ротора 2, находящегося внутри статора 3, посредством ведущего вала 4 с помощью первого зубчатого передаточного механизма 5, представляющего собой зубчатую передачу с непосредственным касанием закрепленных на валах зубчатых колес, состоящую из колесной пары и конструктивно выполненную как единое целое и соединенную с валом 4 ротора 2 приводит во вращение ведомый