

На основании проведенных испытаний, микроструктурных исследований наилучшим комплексом свойств обладает сталь 35ХАФ по сравнению со сталью 40Х.

Список литературы

1. Потак Я.М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 208 с.
2. Малкин В.Я., Подкидышев В.В. // Повышение конструктивной прочности сталей и сплавов: материалы семинара. М.: Московский дом научно-технической пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского, 1970. Т. 2.
3. Голиков И.Н., Гольдштейн М.И., Мурзин И.И. Ванадий в стали. М.: Металлургия, 1968. 292 с.
4. Упрочнение конструкционных сталей нитридами / Гольдштейн М.И., Гринь А.В., Блэм Э.Э., Панфилова Л.М. М.: Металлургия, 1970. 222 с.
5. Ibrahim M. Ghayad, Taha Mattar. Influence of vanadium on the properties and corrosion behaviour of carbon steel // Steel Grips. 2004. Vol. 2, № 4. P. 274-278.
6. Крутикова И.А., Панфилова Л.М., Смирнов Л.А. Исследование склонности к замедленному разрушению высокопрочных болтовых сталей, микролегированных ванадием и азотом // Металлург. 2010. № 1. С. 59-64.
7. Саррак В.И., Филиппов Г.А. Задержанное разрушение закаленной стали // Проблемы металловедения и физики металлов. М.: Металлургия, 1973. Т. 2. С. 134-140.
8. Статическая прочность и механика разрушения сталей: сб. науч. тр. / пер. с нем. В. А. Федоровича; под ред. В. Даля, В. Антона. М.: Металлургия, 1986. 566 с.
9. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С. Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 306 с.
10. Asahi H., Hirakami D. and Yamasaki S. Hydrogen trapping behavior in vanadium-added steels // ISIJ International. 2003. Vol. 43, № 46. P. 527-533.
11. Yamasaki S., Masubuki, Toshimi T. // Nippon Steel Technical Report. July 1999, № 80, P. 50-55.
12. Саррак В.И., Филиппов Г.А. О природе инкубационного периода задержанного разрушения закаленной стали // ФММ. 1974. Т. 32, № 6. С. 1266-1273.
13. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.
14. Фрактографическое и акустико-эмиссионное наблюдение зарождения интеркристаллитной трещины при замедленном разрушении / Забильский В.В., Бартнев О. А., Величко В. В., Полонская С. М. // ФММ. 1986. Т. 62, № 4. С. 793-800.
15. Фрактографическое исследование роста усталостных трещин в низ-

кооптупленных сталях / Романив О.Н., Деев Н.А., Гладкий Я.Н., Студент А.З. // ФХММ. 1975. Т. 11, № 5. С. 23-28.

16. Романив О.Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. М.: Металлургия, 1979. 175 с.
17. Fournelle at all // Met. Tran. 1996. V A 7, N 5. P. 669-682.
18. Brown M.I., Embury J.D. // Acta metallurgica. 1972. Vol. 20, № 4. P. 627-635.

Bibliography

1. Potak J.M. High-strength steels. M.: Metallurgy, 1972. 208 P.
2. Malkin V.Y., Podkidyshev V.V. // Increase of constructive strength of steels and alloys», v.2: Materials of a seminar of. The Moscow house of scientific and technical propagation of a name F.E.Dzerzhinskogo. M. : 1970.
3. Golikov I.N., Goldstein M.I., Murzin I.I. Vanadium in steel. M: Metallurgy. 1968, 292 p.
4. Goldstein M.I., Griny A.B., Blium E.E., Panfilova L.M. Hardening of structural steel by nitrides. M.: Metallurgy, 1970. 222 p.
5. Ibrahim M. Ghayad, Taha Mattar. Influence of vanadium on the properties and corrosion behaviour of carbon steel // Steel Grips. 2004. Vol. 2, № 4. P. 274-278.
6. Krutikova I.A., Panfilova L.M., Smirnov L.A. Investigation of static fatigue tendency for high strength bolt steels micro alloyed by vanadium and nitrogen // Metallurgist. 2010, № 1. P. 59-64.
7. Sarrak V.I., Phillipov G.A. // Collection: Problems of physical metallurgy and physics of metals. M.: Metallurgy. 1973. Vol. 2, P. 13-140.
8. Static strength and mechanics of destruction / under edition A. Dale, V. Anton. M. : Metallurgy, 1986. -566 p.
9. Goldstein M.I., Litvinov V.S. Physics of metals of high- strength alloying, M.: Metallurgy. 1986. - 306 P.
10. Asahi H., Hirakami D. and Yamasaki S. Hydrogen trapping behavior in vanadium-added steels // ISIJ International. 2003. Vol. 43, № 46, P. 527-533.
11. Yamasaki S., Masubuki, Toshimi T. // Nippon Steel Technical Report №. 80, July 1999. P.50-55.
12. Sarrak V.I., Phillipov G.A. // Physics of metals and metallurgical science. 1974. Vol. 32, № 6. P. 1266-1273.
13. Ivanova V.S., Terentyev V.F. Nature of fatigue of metals. M. : Metallurgy, 1975. 456 p.
14. Zabil'skij V.V., Bartenev O.A., Velichko V.V., Polonskaja S.M. // Physics of metals and metallurgical science. 1986 Vol. 62, № 4. P. 793-800.
15. Romaniv O.N., etc. // ФХММ. 1975. Vol. 11, № 5. P. 23-30.
16. Romaniv O.N. Toughness of destruction of constructional steels. M.: Metallurgy, 1979. 175 p.
17. Fournelle at all // Met. Trans. 1996, Vol A 7, N 5. P. 669-682.
18. Brown M.I., Embury J.D. // Acta metallurgica. 1972. Vol. 20, № 4. P. 627-635..

УДК 62-83

Омельченко Е.Я., Моисеев В.О.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ И МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МЕХАНИЗМА

Приведены уравнения расчета момента сопротивления и момента инерции механизма по экспериментальным осциллограммам пуска и торможения от задатчика интенсивности и источника момента. Представлены практические механические характеристики, снятые по разработанной методике для волочильных станов стальной проволоки с электроприводом по системе «преобразователь частоты - асинхронный двигатель».

**Ключевые слова:** электропривод, методика, момент сопротивления, момент инерции.

The article describes equations for the calculation of the mechanism drag torque and inertia using startup and slowdown experimental oscillograph records taken from the setup unit of moment intensity and source. The authors present practical mechanical characteristics obtained in accordance with the method developed for steel wire drawing mills equipped with «frequency converter – induction motor» electric drives.

**Key words:** electric drive, method, drag torque, inertia.

Качество настройки регулируемого электропривода (ЭП) непосредственно влияет на качественные и количественные характеристики технологического процесса. Для современных электроприводов по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД), характеризующихся высоким быстродействием, важными параметрами при наладке являются суммарный момент инерции ЭП и зависимость статического момента сопротивления механизма от угловой скорости вращения двигателя [1]. Су-

ществующие методики свободного выбега [2] характеризуются низкой точностью и большой трудоёмкостью определения этих параметров ЭП. Предлагаемая методика строится на использовании специализированного микропроцессорного устройства (СМПУ), являющегося неотъемлемой частью современных систем ПЧ-АД.

В основу методики расчета положены уравнения динамики одномассовой системы ЭП с постоянным моментом инерции для пуско-тормозных режимов:

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} \frac{d\omega_{\Pi}}{dt} &= M_{\Pi}(t) - M_C(\omega), \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega_T}{dt} &= -M_T(t) + M_C(\omega), \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции ЭП, приведенный к валу двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $M_{\Pi}(t), M_T(t)$  – электромагнитные моменты двигателя для режимов пуска и торможения соответственно, Н·м;  $d\omega/dt = \dot{\omega}$  – первая производная угловой скорости по времени, 1/с<sup>2</sup>;  $M_C(\omega)$  – зависимость момента статических сопротивлений механизма от угловой скорости вращения, приведенная к валу двигателя, Н·м.

В системе уравнений (1) предусмотрено, что при торможении производная  $\dot{\omega}_T$  принимает положительное значение, если угловая скорость  $\omega$  положительная. В этом случае для режима торможения достаточно выполнить условие  $M_T(t) < M_C(\omega)$ .

При заданных темпах пуска и торможения (управление АД от задатчика интенсивности (ЗИ) при  $\dot{\omega} = const$ ) расчет заданных параметров выполняется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} &= (M_{\Pi}(\omega) - M_T(\omega)) / (\dot{\omega}_{\Pi} + \dot{\omega}_T), \\ M_C(\omega) &= (M_{\Pi}(\omega) + M_T(\omega) - J_{\Sigma}(\dot{\omega}_{\Pi} - \dot{\omega}_T)) / 2, \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $M_{\Pi}(\omega), M_T(\omega)$  – значения электромагнитных моментов двигателя при угловой скорости  $\omega$ .

Формулы (2) упрощаются, если темпы пуска и торможения равны ( $\dot{\omega}_{\Pi} = \dot{\omega}_T$ ):

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} &= (M_{\Pi}(\omega) - M_T(\omega)) / (2\dot{\omega}_{\Pi}), \\ M_C(\omega) &= (M_{\Pi}(\omega) + M_T(\omega)) / 2. \end{aligned} \right\} (3)$$

В некоторых системах регулирования (намоточные устройства) режимы пуска и торможения могут управляться от регулируемого источника момента (РИМ), когда в процессе управления ЭП с помощью быстродействующей системы регулирования поддерживается значение электромагнитного момента двигателя на уровне заданного или постоянного. В этом случае расчет заданных параметров выполняется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} &= (M_{\Pi} - M_T) / (\dot{\omega}_{\Pi}(\omega) + \dot{\omega}_T(\omega)), \\ M_C(\omega) &= (M_{\Pi} + M_T - J_{\Sigma}(\dot{\omega}_{\Pi}(\omega) - \dot{\omega}_T(\omega))) / 2, \end{aligned} \right\} (4)$$

где  $\dot{\omega}_{\Pi}(\omega), \dot{\omega}_T(\omega)$  – значения темпов пуска и торможения двигателя при угловой скорости  $\omega$  и постоянных моментах двигателя.

Формулы (4) упрощаются, если пусковой и тормозной моменты по абсолютной величине равны ( $M_{\Pi} = -M_T$ ):

$$\left. \begin{aligned} J_{\Sigma} &= 2M_{\Pi} / (\dot{\omega}_{\Pi}(\omega) + \dot{\omega}_T(\omega)), \\ M_C(\omega) &= M_{\Pi}(\dot{\omega}_{\Pi}(\omega) - \dot{\omega}_T(\omega)) / (\dot{\omega}_{\Pi}(\omega) + \dot{\omega}_T(\omega)). \end{aligned} \right\} (5)$$

Методика определения  $J_{\Sigma}$  и  $M_C(\omega)$  сводится к следующему:

– с помощью СМПУ по прикладным программам записываются в память ПЭВМ переходные процессы электромагнитного момента  $M(t)$  и угловой скорости вращения  $\omega(t)$  при пуске и торможении;

– при управлении от ЗИ в осях  $M, \omega$  строятся зависимости  $M_{\Pi}(\omega), M_T(\omega)$  и по формулам (2) или (3) для заданных угловых скоростей рассчитываются  $J_{\Sigma}$  и  $M_C(\omega)$ ;

– при управлении от РИМ для пуска и торможения дополнительно рассчитываются производные  $\dot{\omega}_{\Pi} \approx \Delta\omega_{\Pi}/\Delta t$  и  $\dot{\omega}_T \approx -\Delta\omega_T/\Delta t$ ;

– в осях  $\dot{\omega}, \omega$  строятся зависимости  $\dot{\omega}_{\Pi}(\omega), \dot{\omega}_T(\omega)$  и по формулам (4) или (5) при известных  $M_{\Pi}, M_T$  для заданных угловых скоростей рассчитываются  $J_{\Sigma}$  и  $M_C(\omega)$ .

Одним из критериев правильности расчетов может служить постоянство рассчитанного значения  $J_{\Sigma}$ , т.к. методика строится из предположения  $J_{\Sigma} = const$ .

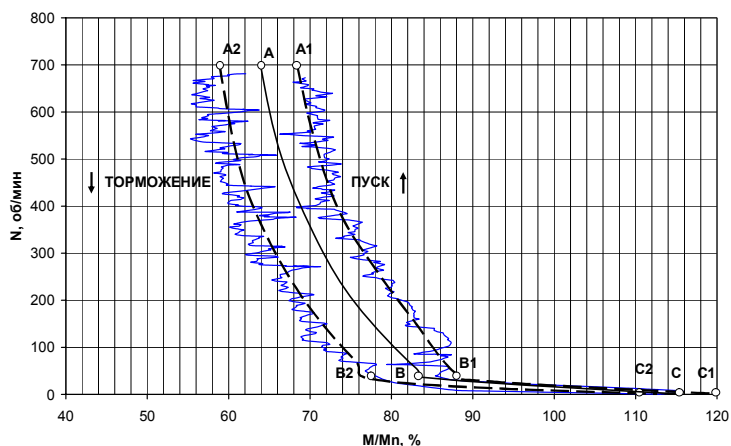
Для примера рассмотрено практическое применение предлагаемой методики. На рисунке приведены механические характеристики  $M/M_H(N)$  стана мокрого волочения 650/12 (см. рисунок, а) при волочении труднодеформируемой стали ст80 и стана тонкого волочения UDZWGT 80/21 (см. рисунок, б) при волочении пластичной стали ст3.

Регистрация характеристик выполнялась на базе преобразователей частоты типа *Commander SK (Control Techniques, Англия)* с использованием программ *CT Soft* и *CT Scope*. Дальнейшая обработка результатов выполнена в программе XL.

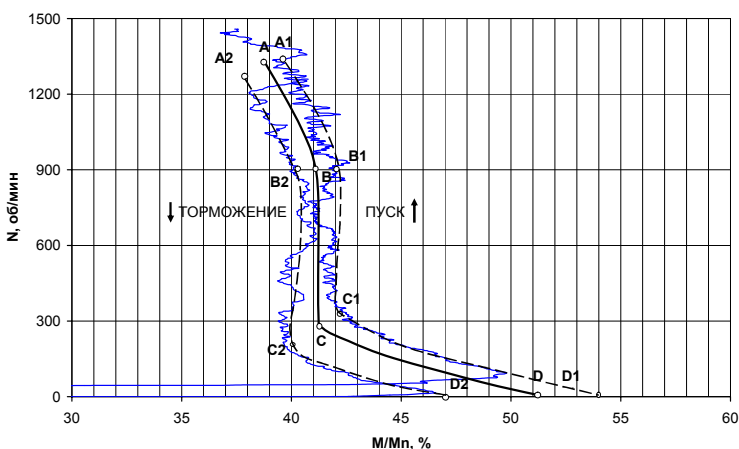
При запрограммированном маршруте волочения записаны параметры  $M/M_H(t)$  и  $N(t)$  для режимов пуска ( $A_1B_1C_1D_1$ ) и торможения ( $A_2B_2C_2D_2$ ) при управлении от ЗИ. По формулам (2) рассчитаны значения  $M_C(N)$  (ABCD) и  $J_{\Sigma}$  (см. таблицу).

Параметры ЭП и значения  $J_{\Sigma}$

Параметр	Стан мокрого волочения	Стан тонкого волочения
Двигатель	4A280M8	4A180M4
$P_H$ , кВт	75	30
$M_H$ , Н·м	976.4	194.7
рп	4	2
$N_H$ , об/мин	733	1471.5
Преобразователь частоты	SK 5401	SK 4401
$P_H$ , кВт	75	37
$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	4.1	0.23
$J_{\Sigma}$ , кг·м <sup>2</sup>	14.63	0.494



а



б

**Механические характеристики станов мокрого (а) и тонкого (б) волочения**

Полученные зависимости  $M_C(N)$  для волочильных станов показывают наличие момента трогания, достигающего до 120% от номинального (участок СВ,

см. рисунок, а). Это объясняется большим моментом скольжения на шкивах трения и недостатком смазки в волоках при низких скоростях. Наклонные участки АВ с уменьшением момента при увеличении скорости объясняются улучшением смазки, снижением усилия волочения и момента скольжения. Полученные зависимости использованы при выборе максимальной мощности преобразователей частоты и структуры регулирования МПСУ, а также при определении рациональной скорости волочения, обеспечивающей минимальное электропотребление и максимальную производительность стана.

Рассчитанные значения  $J_\Sigma$  в 2,5–3,5 раз превышают моменты инерции двигателей, что полностью подтверждается ранее проведенными расчетами.

Предлагаемая методика расчета  $M_C(N)$  и  $J_\Sigma$  проста в применении и может быть рекомендована для систем ПЧ-АД с МПСУ при выполнении пуско-наладочных работ.

**Список литературы**

1. Омельченко Е.Я. Исследование электромеханической системы намоточного аппарата проволочного волочильного стана / Е.Я. Омельченко, А.А. Радионов, В.А. Бондаренко // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 18. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. С. 9–27.
2. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.М. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1977. 192 с.

**Bibliography**

1. Omelchenko E.Ya. The study of the electromechanical system of the wire drawing mill coiler / E.Ya. Omelchenko, A.A. Radionov, V.A. Bondarenko // Electromechanical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers. Issue 18. Magnitogorsk: GOU VPO MSTU, 2010. pp. 9–27.
2. Garnov V.K., Rabinovich V.B., Vishnevetskiy L.M. Standardized systems of the electric drive automatic control in metallurgy. 2<sup>nd</sup> edition revised and enlarged. M.: Metallurgy, 1977, 192 p.

УДК 621.926-251

Макаров А.Н., Хозей А.Б.

**РАСЧЕТ УГЛА ПРЕЦЕССИИ РОТОРА И ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ЕГО ОПОРУ**

В статье рассмотрена динамическая устойчивость ротора центробежно-ударной дробилки. Выражены зависимость угла прецессии ротора и реакция радиальной опоры от приложенной к нему нагрузки, необходимые для выполнения проекторочного расчета элементов дробилки.

**Ключевые слова:** прецессия, гироскоп, дробилка, ротор, опора.

The article considers the dynamic stability of rotor-centrifugal impact crusher. Pronounced dependence of the precession angle of the rotor and the response of the radial bearing loads applied to it, necessary to perform the calculation of elements of a drawing crusher.

**Key words:** precession, gyroscope, crusher, rotor, bearing.

В настоящее время центробежно-ударные дробилки (ДЦ) отечественного производства (ЗАО «Урал-Омега») используют в своей конструкции сферические газостатические опоры (ГСО) ротора, позволяющие

погасить всю непредсказуемость нагрузок, присущих технологическому процессу ударного дробления.

Сферические ГСО ДЦ были запроектированы таким образом, чтобы обеспечить применение простого