

DESIGN OF TECHNOLOGICAL  
COMPLEXES FUNCTIONAL ELEMENTS

ПРОЕКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
КОМПЛЕКСІВ

Świć A., Prof. D.Sc., Ph.D., Eng. \*  
Drachev O., Prof. D.Sc., Ph.D., Eng. \*\*  
Sobaszek Ł., M.Sc., Eng. \*

\*Lublin University of Technology / Poland  
\*\*Togliatti State University / Russia

RESEARCH PROCESS THE STRAIGHTENING OF LOW-RIGIDITY SHAFTS

BADANIA PROCESU PROSTOWANIA WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

**Abstract:** The paper presents the results of research conducted in order to obtain the algorithm of long, low-rigidity shafts cold straightening process, transfer functions of control object – the straightening process, and a schematic diagram of automatic control system for straightening by bending process. The authors describe the functional diagram of a multi-input recorder, the cyclogram of control system functioning, and the geometric interpretation of the process for the material in elastic-deformable state. The test stand and the results of experimental research of the process with the use of automatic control system are described.

**Keywords:** long non-rigid shaft, dynamic straightening, automatic control system, axial run-out.

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w celu uzyskania algorytmu sterowania procesem prostowania na zimno wałów długo-wymiarowych o niskiej sztywności, transmitancji operacyjnej oraz schematu automatycznego sterowania rozpatrywanego procesu. Autorzy opisują schemat funkcjonalny rejestratora wielow wejściowego, schemat funkcjonowania systemu kontroli wewnętrznej oraz interpretację geometryczną procesu dla materiału w stanie sprężysto-plastycznym. Ponadto opisano stanowisko badawcze oraz wyniki badań doświadczalnych.

**Słowa kluczowe:** długi wał o małej sztywności, prostowanie dynamiczne, automatyczny system sterowania.

INTRODUCTION

When developing algorithms for the control of the process of straightening of long shafts it is necessary to determine the zones of application of external straightening forces. In this case plastic deformations are distributed unevenly, so one should aim at elimination of the unevenness of their distribution. Plastic deformation zones, at high modes, are practically coincident in the case of paired and odd forms, and therefore modal control should be applied – controlled loading should be applied in the zones of opposing nodes [1–3]. If initially the semi-finished products, in accordance with the straightening algorithm, undergo deformation according to the first mode of bending, followed by the second, third etc., each straightening module acts as an autonomous one in agreement with the new developed algorithm. Irrespective of the length of the semi-finished product and of the method of its straightening, elastic-plastic deformation occurs between the supports. It is possible to calculate, in the first approximation, the values of stresses and plastic strains in the semi-finished products, and the depth of their location, as the distance between the supports and the geometric parameters of the semi-finished products are always known.

CONTROL SYSTEM OF THE PROCESS  
OF STRAIGHTENING OF LOW-RIGIDITY PARTS

When developing a system of automatic control of the process of straightening it is necessary to solve the problem of improvement of accuracy that cannot be solved without performing a theoretical analysis of

WPROWADZENIE

Przy opracowaniu algorytmu sterowania procesem prostowania wałów długowymiarowych trzeba określić strefy przyłożenia zewnętrznych sił prostowania. Odształcenia plastyczne w tym przypadku są rozłożone nierównomiernie, należy więc dążyć do likwidacji nierównomierności ich rozkładu. Strefy odształceń plastycznych, przy wysokich modach, w przypadku postaci parzystych i nieparzystych praktycznie się pokrywają, w związku z tym powinno być stosowane sterowanie modalne – obciążenie sterowane należy przykładać w strefach przeciwwęzłów [1–3]. Jeżeli początkowo półfabrykaty, zgodnie z algorytmem prostowania, ulegają odształceniu według pierwszego sposobu zginania, następnie drugiego, trzeciego itd., to każdy moduł prostowania działa jako autonomiczny zgodnie z programem według nowego, opracowanego algorytmu. Niezależnie od długości półfabrykatu i sposobu jego prostowania, odształcenie sprężysto-plastyczne ma miejsce między podporami. Można obliczyć, w pierwszym przybliżeniu, wartości występujących w półfabrykacie naprężeń i odształceń plastycznych oraz głębokość ich zalegania, ponieważ zawsze jest znana odległość między podporami i parametry geometryczne półfabrykatu.

UKŁAD STEROWANIA PROCESEM  
PROSTOWANIA CZĘŚCI O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Przy opracowaniu układu sterowania automatycznego procesem prostowania należy rozwiązać zadanie zwiększenia dokładności. Analiza schematu strukturalnego (rys. 1), umożliwia: określenie prawid-

the control system being developed. Analysis of structural schematic (Fig. 1) permits determination of correct restoration of output control signal, development of servomechanism design, determination of method of measurement of controlled value, and development of a schematic permitting the generation of desired signal. Based on the adopted solutions one may select, from the available offer, the elements of the automatic control system, present the system in the form of a mathematical model, set the system up and perform its testing.

The mathematical model of the object of control includes an operator transmittance composed of three parallel links with oriented effect, the input of which is the force of straightening and the output is displacement.

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{P(s)} = K_1(s) + K_2(s) - K_2^1(s). \quad (1)$$

The semi-finished products rotates and the value of its eccentric is included in the integral index of the value of deflection. In the structural schematic (Fig. 1), the run-out (eccentric) value is denoted as  $e(s)$ , and the combined value of semi-finished product deflection and run-out, denoted as  $Y_2(s)$ , is controlled by means of a run-out sensor with operator transmittance  $K_3(s)$ . The primary transducer-sensor for the control of semi-finished product run-out is switched on only when the axis of the semi-finished product is identical with the axis of the machine tool (lathe). The output signal from the primary transducer, in accordance with the algorithm of straightening, is supplied to the input of a calculation-programming device with operator transmittance  $K_4(s)$ . The calculation-programming device calculates the rigidity of the subsystem of semi-finished product-supports. It determines, taking into account the current conditions and values of deformations of the semi-finished product, the zones of elastic and plastic deformations. According to the developed algorithm, based on the actual geometric parameters of the semi-finished product and on its physical and mechanical properties, on the output of the device a control signal is generated for an electro-hydraulic amplifier (EHA) with operator transmittance  $W_5(s)$ . The EHA controls the position of the rod of the hydraulic drive  $W_6(s)$ . The rod is firmly joined with a punch whose operator transmittance, as an elastic link, equals  $W_7(s)$ . The punch is in direct contact with the semi-finished product, sensing the response of the semi-finished product in the process of deformation. The straight-tening forces are controlled by means of the force sensor  $W_8(s)$  whose output signal, proportional to the straightening force value, is transmitted to the input of the calculation-programming device  $W_4(s)$ , and thus each circuit is feedback-controlled by the straightening force. In the process of straightening two straightening sections are controlled: the elastic and the plastic, therefore we need to have data on the displacement and force of plastic deformation.

ło-wego odtwarzania wyjściowego sygnału sterującego, opracowanie konstrukcji serwonapędu, określenie metody pomiaru wielkości regulowanej i opracowanie schematu umożliwiającego ukształtowanie odpowiadającego sygnału.

W oparciu o przyjęte rozwiązania można dobrać, spośród produkowanych, elementy układu sterowania automatycznego, przedstawić go w postaci modelu matematycznego, zestawić układ sterowania oraz przeprowadzić jego badanie.

W modelu matematycznym obiektu sterowania występuje transmitancja operatorowa, składająca się z trzech równoległych ogniów o działaniu ukierunkowanym, wejściem, której jest siła prostowania, a wyjściem przemieszczenie.

Półfabrykat obraca się i jego mimośrodowość wchodzi do wskaźnika integralnego wielkości ugięcia. Wartość bicia (mimośrodu), na schemacie strukturalnym (rys. 1), jest oznaczona jako  $e(s)$ , a sumaryczna wielkość ugięcia i bicia półfabrykatu przez  $Y_2(s)$  – jest kontrolowana przy pomocy czujnika bicia o transmitancji operatorowej  $K_3(s)$ . Pierwotny przetwornik – czujnik do kontroli mimośrodu półfabrykatu włączany jest tylko wtedy, kiedy oś półfabrykatu pokrywa się z osią obrabiarki. Sygnał wyjściowy, zgodnie z algorytmem prostowania, z przetwornika początkowego jest przesyłany na wejście urządzenia obliczeniowo-programowego o transmitancji operatorowej  $K_4(s)$ . Urządzenie obliczeniowo-programowe oblicza sztywność podukładu półfabrykat-podpory. Określa, przy uwzględnieniu aktualnych warunków i wielkości odkształceń półfabrykatu, strefy odkształceń sprężystych oraz plastycznych. Według opracowanego algorytmu, na podstawie rzeczywistych parametrów geometrycznych półfabrykatu oraz jego właściwości fizycznych i mechanicznych, jest kształtowany na wyjściu sygnał sterowniczy wzmacniacza elektrohydraulicznego (WEH) o transmitancji operatorowej  $W_5(s)$ . WEH steruje położeniem trzpienia napędu hydraulicznego  $W_6(s)$ . Trzpień jest na sztywno połączony ze stemplem, którego transmitancja operatorowa jako ogniwa sprężystego jest równa  $W_7(s)$ . Stempel styka się bezpośrednio z półfabrykatem, przejmując reakcję półfabrykatu w procesie odkształcenia. Siły prostowania są kontrolowane czujnikiem siły  $W_8(s)$  – jego sygnał wyjściowy, proporcjonalny do siły prostowania jest przekazywany na wejście urządzenia obliczeniowo-programowego  $W_4(s)$ , a więc każdy z obwodów objęty jest sprzężeniem zwrotnym według siły prostowania. W procesie prostowania są kontrolowane dwa odcinki prostowania: sprężysty i plastyczny, należy więc mieć dane o przemieszczeniu i sile odkształcenia plastycznego.

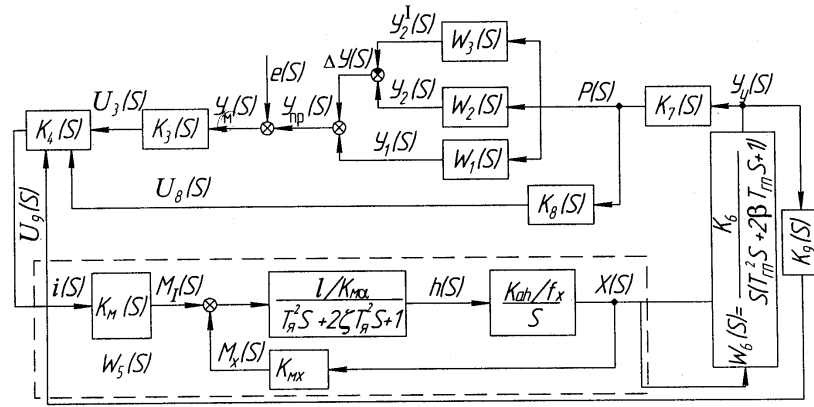


Fig. 1 – Structural schematic of automatic control system of the process of straightening through bending / Schemat strukturalny układu sterowania automatycznego procesem prostowania przez zginanie

In order to control the value of travel of the control slide (value of deformation of the semi-finished product), the primary transducer of linear displacement, with operator transmittance  $K_9(s)$ , is connected into the feedback circuit of the electro-hydraulic drive control. Experimental studies of the electro-hydraulic drive, control blocks and primary transducers [4] showed that all of those elements can be described, with sufficient probability, as inertia-free with amplification coefficient  $\kappa$ , except for the electro-hydraulic amplifier. The two-stage electro-hydraulic amplifier includes a transducer with force feedback, a two-slot hydraulic choke divider of the nozzle-stopper type, and a slide-type cylindrical four-slot hydraulic divider. The operator transmittance (Fig. 1) coupling the control slider displacements (output parameter) with the control current (input parameter), taking into account the force of negative feedback, has the form of:

W celu kontroli wielkości przemieszczenia suwaka rozrządczego (wielkości odkształcenia półfabrykatu), do sprzężenia zwrotnego obwodu sterowania napędem elektrohydraulicznym jest włączony przetwornik pierwotny przemieszczeń liniowych i transmitancji operatorowej  $K_9(s)$ . Z badań eksperymentalnych napędu elektro-hydraulicznego, bloków sterowania i przetworników pierwotnych [4], wynika, że wszystkie człony można z wystarczającym prawdopodobieństwem opisać jako bezinercyjne o współczynniku wzmocnienia  $\kappa$ , oprócz wzmacniacza elektrohydraulicznego. Wzmacniacz elektrohydrauliczny dwukaskadowy zawiera: przetwornik z siłowym sprzężeniem zwrotnym – dwuszczelinowy dławikowy rozdzielacz hydrauliczny typu dysza-przysłona oraz suwakowy cylindryczny czteroszczelinowy rozdzielacz hydrauliczny. Transmitancja operatorowa (rys. 1), wiążąca przemieszczenia suwaka rozrządczego (parametr wyjściowy) i prąd sterowania (parametr wejściowy) z uwzględnieniem siły ujemnego sprzężenia zwrotnego ma postać:

$$W_5(s) = \frac{X(s)}{i(s)} = \frac{K_M(s)W_{PEM}(s)W_\gamma(s)}{1 + W_{PEM}(s)W_\gamma(s)K_M(s)} \quad (2)$$

where:  $K_M, K_{MX}$  – coefficients of amplification of slope of instantaneous characteristics of transducer and feedback after loading. The operator transmittance of the electro-mechanical transducer (linearised model) can be written as:

gdzie:  $K_M, K_{MX}$  – współczynniki wzmocnienia nachylenia charakterystyki chwilowej przetwornika i sprzężenia zwrotnego po obciążeniu. Transmitancję operatorową przetwornika elektromechanicznego (model linearyzowany) można zapisać jako:

$$W_{PEM}(s) = \frac{h(s)}{M_I(s)} = \frac{l / K_{M\alpha}}{T_w^2 s^2 + 2\beta T_w s + 1} \quad (3)$$

where:  $h$  – displacement of the free end of the rotor;  $M_I$  – moment on the rotor;  $l$  – length of the rotor;  $K_{M\alpha}$  – angular stiffness of the electromechanical system of the transducer;  $T_w, \beta$  – time constant of the rotor and coefficient of attenuation, respectively.

gdzie:  $h$  – przemieszczenie niezamocowanego końca wirnika;  $M_I$  – moment na wirniku;  $l$  – długość wirnika;  $K_{M\alpha}$  – sztywność kątowna elektromechanicznego układu przetwornika;  $T_w, \beta$  – odpowiednio stała czasowa wirnika i współczynnik tłumienia.

The operator transmittance of the hydraulic amplifier (leaving out the forces of contact friction) is described by the product of the amplifying and integrating elements

$$W_{ry}(s) = \frac{X(s)}{h(s)} = \frac{K_{ah} / F_x}{s}, \quad (4)$$

where:  $x$  – displacement of the four-edge control slide;  $K_{ah}$  – coefficient of amplification – slope of the output characteristics;  $F_x$  – cross section area of the control slide.

The operator transmittance of the hydraulic drive equals to:

$$W_6(s) = \frac{y_y(s)}{x(s)} = \frac{k_{NH}}{(T_{NH}^2 s^2 + 2\beta T_{NH} s + 1)s}, \quad (5)$$

where:  $y_y$  – linear displacement of hydraulic cylinder rod (output value),  $T_{NH}$  i  $k_{NH}$  – time constant and coefficient of amplification of the hydraulic drive.

The general form of the operator transmittance of the electro-hydraulic drive can be written as:

$$W_{NEH}(s) = \frac{y_y(s)}{i(s)} = K_M(s) W_5(s) W_6(s) = \frac{K_M \frac{l}{K_{M\alpha}} \cdot \frac{K_{ah}}{F_x} k_{NH}}{(T_w^2 s^2 + 2\beta T_w s + 1)(T_{NH}^2 s^2 + 2\beta T_{NH} s + 1)s^2 + (T_{NH}^2 s^2 + T_{NH} s + 1)s} \cdot \frac{l \cdot k_{ah}}{F_x}. \quad (6)$$

The circuit of control of the process of deformation of semi-finished product relative to its deformation was the operator transmittance of an open system (Fig. 1).

$$W(s) = \frac{y_y(s)}{U_3(s)} = K_4(s) W_5(s) W_6(s). \quad (7)$$

One of the most important characteristics of an automatic control system is its dynamic accuracy or system error in control and interference effects. The accuracy of a control system is determined in steady state conditions.

Regular effects are treated as a slowly changing function of time in comparison to the characteristics of a transition process in the system. In this case the accuracy of an automatic control system can be estimated by means of the coefficient of error  $H$  that obtained by means of the operator transmittance of a closed system relative to the error,  $W_H(s)$  [5]. In the structural schematic (Fig. 1) the divergence  $H$  between displacements of the input value  $U_{3wej}$  and the output value  $U_{9wyj}$  is defined as:

Transmitancja operatorowa wzmacniacza hydraulicznego (przy nieuwzględnianiu sił tarcia stykowego) jest opisywana iloczynem członów wzmacniającego i całkującego

gdzie:  $x$  – przemieszczenie czterokrawędziowego suwaka rozrządczego;  $K_{ah}$  – współczynnik wzmocnienia – nachylenia charakterystyki wydatku;  $F_x$  – pole przekroju suwaka rozrządczego.

Transmitancja operatorowa napędu hydraulicznego jest równa:

gdzie:  $y_y$  – przemieszczenie liniowe trzpienia cylindra hydraulicznego (wielkość wyjściowa),  $T_{NH}$  i  $k_{NH}$  – stała czasowa i współczynnik wzmocnienia napędu hydraulicznego.

Transmitancję operatorową napędu elektrohydraulicznego w postaci ogólnej można zapisać jako:

Obwód sterowania procesem odkształcenia półfabrykatu według przemieszczenia ma transmitancję operatorową układu otwartego (rys. 1).

Jedną z najważniejszych charakterystyk układu sterowania automatycznego jest jego dokładność dynamiczna lub błąd w układzie przy oddziaływaniach sterujących i zakłócających. Dokładność układu sterowania jest określana w warunkach ustalonych.

Oddziaływania regularne są traktowane jako powoli zmieniająca się funkcja czasu w porównaniu do charakterystyk procesu przejściowego w układzie. W tym przypadku, dokładność układu sterowania automatycznego można oceniać współczynnikiem błędów  $H$ , który uzyskuje się przy pomocy transmitancji operatorowej układu zamkniętego odnośnie błędów  $W_H(s)$  [5]. Na schemacie strukturalnym (rys. 1) rozbieżność  $H$  między przemieszczeniami wielkości wejściowej  $U_{3wej}$  i wyjściową  $U_{9wyj}$  jest określana jako:

$$H(s) = U_{3wej}(s) - U_{9wyj}(s), \quad (8)$$

characterises the inaccuracy of operation of the automatic control system and is treated as an error.

On the basis of the structural schematic (Fig. 1) one can write the relation of  $H(s)$  as:

$$H(s) = U_{3wej}(s) - K_9(s)U_{3wyj}(s); U(s) = K_4(s) - K_5(s)W_6(s). \quad (9)$$

By excluding  $H(s)$  from those relations, we can define the operator transmittances of a closed system as well as the errors:

$$\Phi_0(s) = \frac{Y(s)}{U_3(s)} = \frac{K_4(s)W_5(s)W_6(s)}{1 + K_4(s)W_5(s)W_6(s)K_9(s)}, \quad (10)$$

$$\Phi(s) = \frac{H(s)}{U_3(s)} = \frac{1}{1 + K_4(s)W_5(s)W_6(s)K_9(s)}. \quad (11)$$

In each of the control circuits, the structural schematic has serially connected integrating elements, which means that each circuit has astatism of the second degree. This means [5] that in the steady mode divergences in the next system do not depend on the level of the input signal nor on the rate of its change, and thus the coefficients of error in the system are equal to zero – in the steady mode the error in a control system is determined only by acceleration and by derivatives of an input parameter of a higher order after time. The accuracy of a closed system in steady state increases with increase in the coefficient of amplification of the system in open mode, which results from decrease of the coefficient of error first in terms of position. However, with increase in the coefficient of stability, the closed system approaches the limit of stability. Experience with operation of systems with electro-hydraulic drives shows that the coefficient of gain in a closed circuit should not exceed 1.5. Increase in the accuracy of an automatic control system due to compensation of the effect of interference or to the effect of a control signal, i.e. the creation of a system that is fully invariant relative to control or interfering effects, is not viable in a given case. In practice it is rather hard to achieve  $H(s)=0$ , so that path that should be followed is that of increasing the level of astatism of the control system. In the analysed structural schematic the automatic control system has astatism of the second degree, which is sufficient for achieving straightening accuracy within a working range of frequencies of 0 to 5 Hz.

The structural schematic developed permits assessment of dynamic processes taking place in a control system, taking into account interfering effects and external interference, determination of mutual interactions within the object itself and overall in the control system without the need for introducing correcting links, as well as estimation of error in program development.

charakteryzuje niedokładność pracy układu sterowania automatycznego i traktowana jest jako błąd.

W oparciu o schemat strukturalny (rys. 1) można zapisać zależność  $H(s)$ :

Po wyłączeniu z tych zależności  $H(s)$ , są określane transmitancje operatorowe układu zamkniętego oraz błędy:

Schemat strukturalny, w każdym z obwodów sterowania, ma szeregowo włączone człony całkujące, to znaczy każdy obwód posiada astatyzm drugiego rzędu. Oznacza to [5], że w trybie ustalonym rozbieżności w następnym układzie nie zależą ani od wielkości sygnału wejściowego ani od prędkości jego zmiany, a więc współczynniki błędów w tym układzie są równe zero – w trybie ustalonym błąd w układzie sterowania jest określany tylko przyspieszeniem i pochodnymi parametru wejściowego wyższego rzędu po czasie. Dokładność układu zamkniętego w trybie ustalonym wzrasta przy wzroście współczynnika wzmocnienia tego układu w stanie otwartym, wynika to ze zmniejszenia pierwszego według położenia współczynnika błędu. Jednak przy wzroście współczynnika stabilności układ zamknięty przybliży się do granicy stabilności. Doświadczenie eksploatacji układów o napędach elektrohydraulicznych pokazuje, że współczynnik wzmocnienia w obwodzie zamkniętym nie powinien przekraczać 1,5. Zwiększenie dokładności układu sterowania automatycznego w wyniku kompensacji wpływu zakłócenia lub działania sygnału sterującego, to znaczy utworzenia układu w pełni inwariantnego odnośnie oddziaływania sterującego lub zakłócającego w danym przypadku nie jest celowe. Praktycznie jest dosyć trudno uzyskać  $H(s)=0$ , należy więc pójść drogą zwiększenia rzędu astatyzmu układu sterowania. W rozpatrzonym schemacie strukturalnym układ sterowania automatycznego ma astatyzm drugiego rzędu, jest to wystarczające do uzyskania dokładności prostowania w roboczym zakresie częstotliwości od 0 do 5 Hz.

Opracowany schemat strukturalny umożliwia ocenę procesów dynamicznych zachodzących w układzie sterowania z uwzględnieniem oddziaływań zakłócających i zakłóceń zewnętrznych. Określenie wzajemnych powiązań w samym obiekcie oraz całościowo w obwodzie sterowania przy konieczności wprowadzenia ogniów korygujących, a także ocenę błędów przy dopracowywaniu programu.

Theoretical studies presented in references [1–3] support the viability of application of automatic control. In the case of straightening, problems occur when the parts have stepped diameters (e.g. stepped-diameter shaft) and the ratio of lengths to diameters is greater than thirteen. Straightening by hand or on an automatic device does not permit the required operational accuracy to be achieved. With the application of known methods of automatic straightening by bending there appear irregular plastic deformations along the semi-finished product and on its diameter, which leads to the appearance of non-uniform residual stresses. When the external stress in the process of operation, combined with the internal stress, exceeds the limit of plasticity, the final product will lose its required form. The objective of developing an automatic control system for straightening of long parts is to increase the operational accuracy through the creation of a uniform state of stress along the part, down to a specific depth within the surface layer of the semi-finished product [6].

The essence of the solution lies in a change in the sequence of traditional technological operations through the introduction of dynamic straightening of semi-finished product, followed by the formation of a specific depth of deformed layer, immediately prior to the roughing and profiling, and after those operations. In the process of roughing and profiling the depth and character of stresses should remain unchanged, which can be achieved through elimination and redistribution of surface stresses formed directly in the process of machining of low-rigidity parts, taking into account the changing dynamic characteristics of the machining process itself.

### **TESTING OF TECHNOLOGICAL SPECIFICS OF COLD STRAIGHTENING OF LONG AXISYMMETRICAL SEMI-FINISHED PRODUCTS UNDER CONDITIONS OF FUNCTIONING OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**

A highly important problem is the development of a technology for the manufacture of long axisymmetrical parts of the shaft type, i.e. the achievement of uniform distribution of residual stresses within the whole volume of the part. This can be attained through the development of a fundamentally new method – the method of dynamic straightening in the zones of opposite nodes of higher harmonic modes, beginning with the third harmonic. The semi-finished product rotates and is subjected to radial loads until the appearance of stresses in the material that correspond to the limit of plasticity, and higher, after which, with continued rotation, the loading is gradually reduced to zero.

Experiments carried out confirmed the correctness of the theoretical studies, which permitted the development and testing of a test station equipped with an automatic control system for cold straightening of axisymmetrical parts, both cylindrical and with stepped diameters, with lengths of up to 3.5 m and diameters up to 60 mm (data from experiments performed).

Badania teoretyczne przedstawione w pracach [1–3] potwierdzają celowość zastosowania prostowania automatycznego. Przy prostowaniu powstają trudności w przypadku, gdy części mają stopnie (na przykład wał stopniowany) i stosunek długości do średnic jest większy niż trzynastokrotnie. Prostowanie ręczne lub na automacie nie pozwala uzyskać wymaganej dokładności eksploatacyjnej. Przy zastosowaniu znanych sposobów prostowania automatycznego przez zginanie powstają nierównomierne odkształcenia plastyczne wzdłuż półfabrykatu i na średnicy, co prowadzi do powstawania nierównomiernych naprężeń szczątkowych, kiedy zewnętrzne naprężenie w procesie eksploatacji łącznie z wewnętrznym przekracza granicę plastyczności, gotowy wyrób traci wymagany kształt. Celem opracowania układu sterowania automatycznego prostowania części długowymiarowych jest zwiększenie dokładności eksploatacyjnej w wyniku wytworzenia równomiernego stanu naprężeń wzdłuż części, do określonej głębokości warstwy powierzchniowej półfabrykatu [6].

Istota rozwiązania polega na zmianie kolejności tradycyjnych operacji technologicznych w wyniku wprowadzenia dynamicznego prostowania półfabrykatu, a następnie ukształtowaniu określonej głębokości warstwy odkształconej, bezpośrednio przed obróbką zgrubną i dokładną oraz po nich. W procesie obróbki zgrubnej i dokładnej głębokość i charakter naprężeń powinny być niezmiennie, co można osiągnąć w wyniku wyeliminowania i redystrybucji naprężeń powierzchniowych, powstających bezpośrednio w procesie obróbki mechanicznej części o małej sztywności przy uwzględnieniu zmieniających się charakterystyk dynamicznych samego procesu skrawania.

### **BADANIE TECHNOLOGICZNEJ SPECYFIKI PROSTOWANIA NA ZIMNO DŁUGOWYMIAROWYCH OSIOWOSYMETRYCZNYCH PÓLFABRYKATÓW W WARUNKACH FUNKCJONOWANIA AUTOMATYCZNEGO SYSTEMU STEROWANIA**

Bardzo istotnym zadaniem jest opracowanie technologii wykonania długowymiarowych osiowo-symetrycznych części typu „wał”, to znaczy uzyskanie równomiernego rozkładu naprężeń szczątkowych w całej objętości. Można to uzyskać w wyniku opracowania zasadniczo nowej metody – prostowania dynamicznego w strefach przeciwwęzłów wyższych postaci harmonik, począwszy od trzeciej postaci. Półfabrykat obraca się i jest obciążany siłą poprzeczną do powstania w materiale naprężeń, odpowiadających granicy plastyczności i wyższych, a następnie w trakcie jego obrotów, obciążenie jest stopniowo redukowane do zera.

Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły prawidłowość badań teoretycznych, co umożliwiło opracowanie i przeprowadzenie testów stanowiska, wyposażonego w układ sterowania automatycznego do prostowania na zimno części osiowo-symetrycznych, stopniowanych oraz gładkich o długości do 3,5 m i średnicy do 60 mm (dane z przeprowadzonych badań).

The developed technology was applied to shafts of stainless steel, used in turbo-compressor devices. The operation of cold straightening was not the final operation, but an operation applied to form the longitudinal geometric accuracy after rough turning and prior to heat treatment. Depending on the future function of the ready product, on the required accuracy and reliability, and on the external dynamic loads, the operation of cold straightening can also be applied as the final operation (finishing treatment) or as an intermediate operation (roughing), also in cases of unsatisfactory results of heat treatment or turning, as the device permits straightening of cylindrical as well as stepped-diameter products.

Opracowaną technologię zastosowano do wałów ze stali nierdzewnych, stosowanych na urządzenia turbosprężarkowe. Operacja prostowania na zimno nie była operacją końcową, lecz kształtującą wzdlużną dokładność geometryczną po toczeniu zgrubnym, a przed obróbką cieplną. W zależności od przeznaczenia wyrobu gotowego, wymaganej dokładności i niezawodności, a także dynamicznych obciążeń zewnętrznych, operacja prostowania na zimno może być zastosowana także jako końcowa (dokładna) oraz jako pośrednia (zgrubna), również w przypadku niezadowolających wyników obróbki cieplnej lub toczenia, ponieważ urządzenie umożliwia prostowanie wyrobów gładkich i stopniowanych.

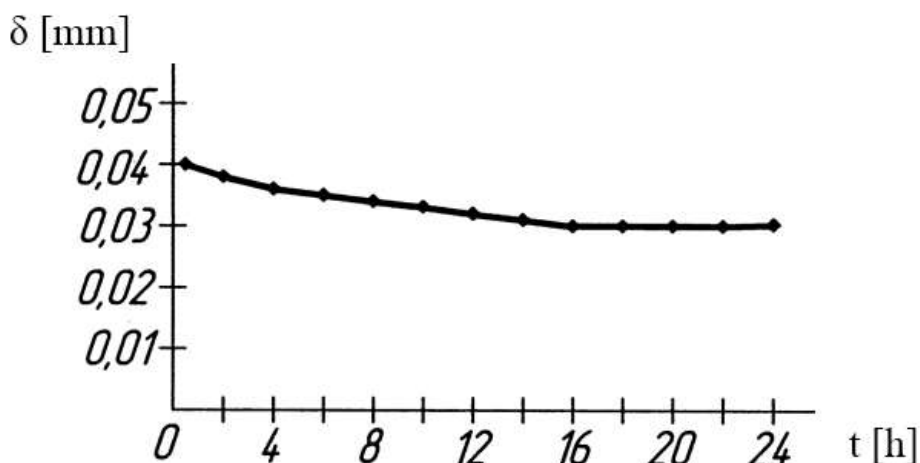


Fig. 2 – Measurement of shaft run-out after straightening by bending with rotation in the zone of opposite nodes / Pomiar bicia wałów po prostowaniu przez zginanie z obrotem w strefach przeciwwęzłów

For the verification of the technology, the shaft of borehole pump type J-606 was applied, with diameter of 38 mm and length of 3470 mm, made of steel grade 12X18H10T, and the shaft of pump J109, with diameter of 38 mm and length of 2241 mm, of steel grade 40XH. Prior to the operation of cold straightening, a semi-finished product with diameter of 45 mm was subjected to turning on lathe type PB-106, equipped with an automatic control system: rough turning to diameter of 40 mm with accuracy up to 0.025 mm/m; at the ends of the semi-finished product M 42×2.5 thread was cut. The process of machining was described in detail in references [2, 3, 8]. Prior to the turning operation the semi-finished product had run-out within the range of 5–7 mm on the whole length. After the rough turning in self-centring hydraulic steadies the run-out did not exceed 1.5–2 mm. For the evaluation of straightening by bending, in the zones of opposite nodes comparative estimation of straightening was performed in static mode and with rotation of the part. The results of measurements of the shafts after straightening at zones of maximum run-out are presented in Fig. 2. Generally, the shaft had the maximum bending in its central part.

Do sprawdzenia technologii zastosowano wał pompy wglębnej J-606 o średnicy 38 mm i długości 3470 mm ze stali 12X18H10T oraz wał pompy J109 o średnicy 38 mm, długości 2241 mm ze stali 40XH. Przed operacją prostowania na zimno półfabrykat o średnicy 45 mm był poddany obróbce toczeniem na tokarce PB-106, wyposażonej w układ stertowania automatycz-nego: toczenie zgrubne do średnicy 40 mm z dokładnością nieprzewyższającą 0,025 mm/m; na końcach półfabrykatu nacięto gwint M 42×2,5. Proces obróbki mechanicznej dokładnie opisano w pracach [2, 3, 8]. Przed operacją toczenia, półfabrykat miał bicie w zakresie 5–7 mm na całej długości. Po toczeniu zgrubnym w samocentrujących podtrzymałkach hydraulicznych bicie nie przekraczało 1,5–2 mm. W celu oceny prostowania przez zginanie w strefach przeciwwęzłów przeprowadzono ocenę porównawczą prostowania w położeniu statycznym oraz prostowania przy obrotach części. Wyniki pomiarów wałów po prostowaniu w maksymalnych strefach bicia przedstawiono na rys. 2. W zasadzie wał ma maksymalną krzywiznę w swojej części centralnej

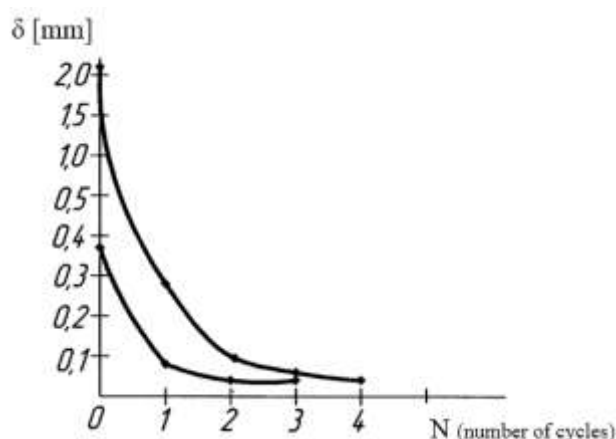


Fig. 3 – Change in shaft run-out in relation to number of cycles of straightening with rotation of the part / Zmiana bicia wałów w zależności od ilości cykli prostowania przy obrocie części

The results of measurements of run-out of shafts with different initial bend, in relation to the number of cycles of straightening, are presented in Fig. 3. The measurements, performed after straightening in a device equipped with an automatic control system, demonstrate that maximum run-out after 24 h varies within the range of 15 to 20%. This indicates stability of shape obtained through minimisation of non-uniformity of distribution of residual stresses of the first order. Studies on the spontaneous bending of parts, caused by relaxation processes and technological heritability, showed that the process does not depend on the initial bend of a shaft and the coefficient of scale. Shafts with large differences in diameter steps were straightened beginning with the section of the largest diameter to that with the smallest diameter. In the proposed technology of manufacturing of shafts of stainless steel, work-hardening on the surface of the part in the zones of maximum loading is not significant, as the operation of cold straightening is followed by operations of quenching and tempering with the application of controlled axial forces.

The performance of heat treatment without preliminary machining and straightening, even in a device whose material has a linear thermal expansion coefficient greater than that of the shaft material, did not produce satisfactory results; the warping of shafts after quenching reached the level of up to 8 mm.

The developed method of straightening while rotating the part and bending in the zones of opposite nodes, with the application of automatic control system, permitted the achievement of accuracies within the range of 25 to 30  $\mu\text{m}/\text{m}$ , reducing the labour requirements and the amounts of material used for manufacturing semi-finished products. The constructed station for cold straightening can also be applied for final – accurate – operations, in the case of which operational accuracy, taking into account relaxation processes, corresponds to the range of 0.1–0.5  $\mu\text{m}/\text{m}$ , e.g. as in the case of cold straightening of long lead-screws of lathes.

Wyniki pomiarów bicia wałów, o różnym ugięciu początkowym w zależności od cykli prostowania, przedstawiono na rys. 3. Przeprowadzone pomiary, po prostowaniu w urządzeniu wyposażonym w układ sterowania automatycznego, pokazują, że bicie maksymalne po 24 h zmienia się w zakresie od 15 do 20%. Świadczy to o stabilności kształtu uzyskanego w wyniku minimalizacji nierównomierności rozkładu naprężeń szczytkowych pierwszego rzędu. Badania samoczynnego skrzywienia części spowodowanego procesami relaksacyjnymi i dziedzicznością technologiczną pokazały, że proces ten nie zależy od początkowej krzywizny wału i współczynnika skali. Wały o dużej różnicy średnic stopni prostowano, począwszy od stopnia o średnicy największej aż do stopnia o średnicy najmniejszej. Zgniot na powierzchni części w strefach maksymalnego obciążenia, w proponowanej technologii wytwarzania wałów ze stali nierdzewnych, nie ma istotnego znaczenia, ponieważ po prostowaniu na zimno następują operacje hartowania i odpuszczania z przyłożeniem sterowanych sił osiowych.

Przeprowadzenie obróbki cieplnej, bez wstępnej obróbki mechanicznej i prostowania, nawet w urządzeniu, którego materiał ma współczynnik rozszerzalności liniowej większy od materiału wału nie dało zadowalających wyników, paczanie wałów po hartowaniu dochodziło do 8 mm.

Opracowana metoda prostowania przy obrocie części i zginaniu plastycznym w strefach przeciwnych, przy zastosowaniu układu sterowania automatycznego, umożliwiła uzyskanie dokładności w zakresie od 25 do 30  $\mu\text{m}/\text{m}$ , zmniejszenie pracochłonności wykonania i zużycia materiału na półfabrykaty. Zbudowane stanowisko do prostowania na zimno może być zastosowane również do końcowych – dokładnych operacji, w przypadku których dokładność eksploatacyjna, z uwzględnieniem procesów relaksacyjnych odpowiada zakresowi 0,1–0,5  $\mu\text{m}/\text{m}$ , na przykład przy prostowaniu na zimno długowymiarywych śrub pociągowych.



### CONCLUSION

Modal presentation of processes of control of technological systems with scattered parameters may be applied for the modelling and synthesis of autonomous control systems of high quality. Control forces applied to a semi-finished product in the process of its machining in the zones of opposed nodes of the first three modes of harmonic vibrations can be applied for all basic technological processes of machining of long low-rigidity parts.

The authors designed and constructed a special device for cold straightening, equipped with control systems.

They also designed and verified a new technology for the manufacturing of long parts of the shaft type, with lengths of up to 3500 mm and diameters from 10 to 110 mm, made of stainless machine-steels. The technology provides for the application of all of the developed machinery and devices.

Implementation of the control of elastic-plastic deformation in the process of machining, and of technological methods of equipment, provided with automatic control systems, all developed on the basis of the new scientific principles, permitted the solution of the problem of manufacturing of long axisymmetrical low-rigidity parts of the shaft type. The achieved operational accuracy falls within the range from 15 to 20  $\mu\text{m}/\text{m}$ , the efficiency is from 5- to 7-fold greater than the traditional, and also the required accuracy of surface finish is obtained.

### REFERENCES

- [1]. Mukai R. A. R., Robinson D. J.: Effect of Heat Straightening on Material Properties of Steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASME, Vol. 12, No. 3, pp.188–195, 2000.
- [2]. Drachev O. I., Taranenko V. A., Świć A., Taranenko G. V.: Development of mathematical models of the process of cold straightening of long low-rigidity shafts (in Russian). *Prikl. Mechanika*, 2010.
- [3]. Drachev A. O., Rastorguev D. A., Taranenko G. V., Taranenko V. A., Świć A.: A study on the dynamic system of turning of low-rigidity shafts (in Russian). *PROGRESSIVE TECHNOLOGIES AND SYSTEMS OF MACHINE BUILDING: Mezhdunarodni sbornik nauchnikh trudov*. Donetsk: DonNTU, 2009. Issue 38, pp. 83–94.
- [4]. Poursaeidi E., Yazdi M. K.: Causes of Rotor Distortions and Applicable Common Straightening Methods for Turbine Rotors and Shafts. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* Vol: 5, No: 7, 2011.
- [5]. Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A. A.: Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 15(44), 2004, pp. 1629–1641.

### ZAKOŃCZENIE

Modalne przedstawienie procesów sterowania układami technologicznymi o parametrach rozproszonych, może być zastosowane do modelowania i syntezy autonomicznych układów sterowania o wysokiej jakości. Oddziaływania sterownicze przyłożone do półfabrykatu w procesie jego obróbki w strefach przeciwwęzłów trzech pierwszych postaci własnych drgań mogą być zastosowane do wszystkich podstawowych procesów technologicznych obróbki części długowymiarowych o małej sztywności.

Opracowano i zrealizowano specjalne urządzenia do prostowania na zimno, wyposażone w układy sterowania.

Opracowano i aprobowano nową technologię wytwarzania części długowymiarowych o małej sztywności typu „wał” o długości do 3500 mm i średnicy od 10 do 110 mm, wytwarzanych ze stali konstrukcyjnych nierdzewnych. Technologia przewiduje zastosowanie wszystkich opracowanych urządzeń.

Wdrożenie opracowanych, na podstawie nowej zasady naukowej: sterowania sprężysto-plastycznym odkształceniem w procesie obróbki, metod technologicznych i urządzeń, wyposażonych w układy sterowania automatycznego, umożliwiło rozwiązanie zagadnienia wytwarzania długowymiarowych części osiowosymetrycznych o małej sztywności typu „wał”. Uzyskiwana dokładność eksploatacyjną mieści się w zakresie od 15 do 20  $\mu\text{m}/\text{m}$ , wydajność jest od 5 do 7 razy wyższa od tradycyjnej, uzyskiwana jest również wymagana dokładności powierzchni.

### LITERATURA

- [1]. Mukai R. A. R., Robinson D. J.: Effect of Heat Straightening on Material Properties of Steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASME, Vol. 12, No. 3, pp.188–195, 2000.
- [2]. Drachev O. I., Taranenko V. A., Świć A., Taranenko G. V.: Development of mathematical models of the process of cold straightening of long low-rigidity shafts (in Russian). *Prikl. Mechanika*, 2010.
- [3]. Drachev A. O., Rastorguev D. A., Taranenko G. V., Taranenko V. A., Świć A.: A study on the dynamic system of turning of low-rigidity shafts (in Russian). *PROGRESSIVE TECHNOLOGIES AND SYSTEMS OF MACHINE BUILDING: Mezhdunarodni sbornik nauchnikh trudov*. Donetsk: DonNTU, 2009. Issue 38, pp. 83–94.
- [4]. Poursaeidi E., Yazdi M. K.: Causes of Rotor Distortions and Applicable Common Straightening Methods for Turbine Rotors and Shafts. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* Vol: 5, No: 7, 2011.
- [5]. Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A. A.: Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 15(44), 2004, pp. 1629–1641.

[6]. Świć A., Draczew O., Taranenko W., Majdalawi S. Analytic evaluation of rectilinearity of low rigidity shaft during hardening process. *Advances in Science and Technology Research Journal* Volume 7, No. 17, March 2013, pp. 10–13.

[7]. Świć A., Draczew O., Taranenko W. Zwiększenie dokładności części osiowosymetrycznych w wyniku obróbki cieplno-mechanicznej. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2013.

[8]. Świć A, Taranenko W, Szabelski J.: Modelling dynamic systems of low-rigid shaft grinding. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2011, 2 (50), s. 13–24.

[6]. Świć A., Draczew O., Taranenko W., Majdalawi S. Analytic evaluation of rectilinearity of low rigidity shaft during hardening process. *Advances in Science and Technology Research Journal* Volume 7, No. 17, March 2013, pp. 10–13.

[7]. Świć A., Draczew O., Taranenko W. Zwiększenie dokładności części osiowosymetrycznych w wyniku obróbki cieplno-mechanicznej. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2013.

[8]. Świć A, Taranenko W, Szabelski J.: Modelling dynamic systems of low-rigid shaft grinding. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2011, 2 (50), s. 13–24.