



Studium adaptacji konstrukcji urządzenia kuźniczego TR dla potrzeb metody N-TR

Study of design adaptation of TR forging device for purposes of the N-TR method

(1) W. Walczyk*, (2) M. Gąsioriewicz, (3) J. Lulkiewicz, (4) S. Szkudelski
Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 28.04.2015
Data recenzji: 1.06.2015
Data akceptacji: 30.06.2015

Wkład autorów

- (1) Autor koncepcji, założeń i metod badań, przeprowadzenie badań i opracowanie wyników
- (2) Budowa modeli MES ADINA
- (3) Budowa modeli MES QFORM
- (4) Opracowanie dokumentacji technicznej

Streszczenie

Celem studium było sprawdzenie możliwości stworzenia, na bazie klasycznego urządzenia kuźniczego TR, urządzenia umożliwiającego stosowanie złożonych schematów technologicznych kształtowania wykorbień wałów korbowych. Możliwość stosowania złożonych schematów kształtowania wykorbień pozwoli optymalizować technologię kucia wałów korbowych pod kątem uzyskania dokładniejszego kształtu odkuwki, przy mniejszych naddatkach technologicznych, na co nie pozwala klasyczna metoda TR. Pokazano zasady działania klasycznego urządzenia kuźniczego TR, urządzenia kuźniczego N-TR według patentu chińskiego oraz klasycznego urządzenia RR i udoskonalonego urządzenia NRR. Opracowano założenia konstrukcyjne urządzenia kuźniczego N-TR36, będącego adaptacją klasycznego urządzenia TR36. Urządzenie N-TR36 współpracuje z niezależnym mechanizmem ruchu wyginaka, będącym elementem prasy współpracującej z urządzeniem kuźniczym. W celu zbadania skutków wprowadzenia niezależnego mechanizmu ruchu wyginaka przeprowadzono symulację metodą elementów skończonych (MES) procesu kucia wału korbowego w programie QForm 3D v. 5.1. w klasycznym urządzeniu kuźniczym TR36 i nowym urządzeniu kuźniczym N-TR36. Symulacja MES procesu kucia w urządzeniu N-TR36 wykazała, że siła potrzebna do utrzymania wyginaka w nieruchomej pozycji jest dużo większa niż spodziewana, co prowadzi do konieczności stosowania odpowiednio mocniejszego napędu hydraulicznego wyginaka. W celu określenia skutków adaptacji klasycznego urządzenia TR36 do urządzenia N-TR36 przeprowadzono obliczenia MES głównych elementów obu urządzeń w programie ADINA. Obliczenia wykazały, że wprowadzone zmiany konstrukcyjne wpłynęły pozytywnie na sztywność i wytrzymałość urządzenia kuźniczego N-TR36.

Słowa kluczowe: kucie, wał korbowy, urządzenie kuźnicze, konstrukcja, analiza MES

Article info

Received: 28.04.2015
Reviewed: 1.06.2015
Accepted: 30.06.2015

Authors' contribution

- (1) Author of the concept, assumptions and research methods, investigation and results analysis
- (2) FE ADINA models
- (3) FE QFORM models
- (4) Preparation of the technical documentation

Abstract

The goal of the study was to verify the possibility of creating a device based on the classical TR forging device enabling the utilization of complex technological schemes for forming cranks of crankshafts. The possibility of using complex crank forming schemes will make it possible to optimize shaft forging technology from the perspective of achieving a more accurate forging shape with lower technological allowances, which the classical TR method does not allow for. The operation of the classical TR forging device, N-TR device according to a Chinese patent, and classical RR device, as well as of an improved NRR device, was shown. The design assumptions of the N-TR36 device, an adaptation of the classical TR36 device, were developed. The N-TR36 device cooperates with an independent bending tool motion mechanism, which is a component of the press cooperating with the forging device. In order to study the effects of introducing the independent bending tool motion mechanism, FEM simulation of the crankshaft forging process was conducted using QForm 3D v. 5.1 software for the classical TR36 forging de-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: walczyk@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: walczyk@inop.poznan.pl

vice and new N-TR36 forging device. FEM simulation of the forging process in the N-TR36 device showed that the force required for maintaining the bending tool in an immobile position is much larger than expected, which leads to the necessity of using a more powerful hydraulic drive of the bending tool. To determine the effects of adaption of the classical TR36 device to the N-TR36 device, FEM calculations of the primary components of both devices were conducted using ADINA software. Calculations showed that the introduced design changes had a positive impact on the rigidity and strength of the N-TR36 forging device.

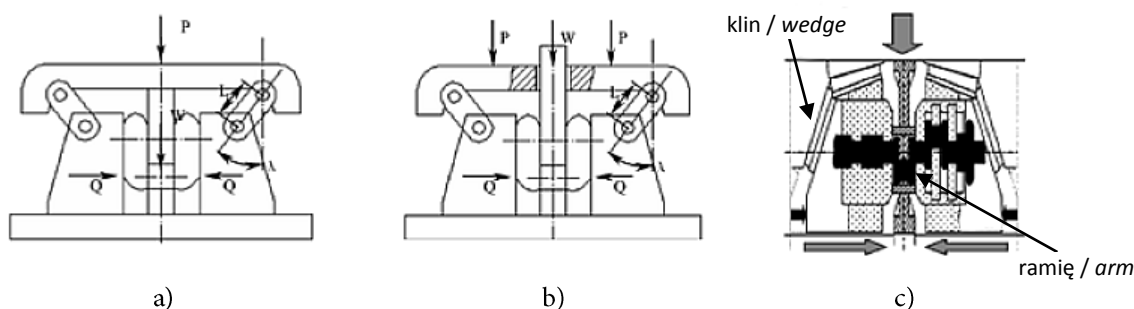
Keywords: forging, crankshaft, forging device, design, FEM analysis

1. WPROWADZENIE

W klasycznym urządzeniu TR [1, 2, 3] ruch narzędzi poziomych (spęczających) i pionowego narzędzia (wyginaka) są ściśle ze sobą powiązane, co uniemożliwia stosowanie złożonych schematów technologicznych kształtowania wykorbienia, a tym samym wygodną i skuteczną optymalizację procesu kucia. W związku z tym, w przypadku wałów korbowych nowszej konstrukcji, o bardziej skomplikowanym kształcie ramion wykorbienia, technologia ta wykazuje istotne niedogodności; trudno uzyskać dobre wypełnienie górnych części ramion, a szczególnie naroży. Pociąga to za sobą konieczność stosowania dużych nadadatków technologicznych zapewniających uzyskanie prawidłowego kształtu wyrobu.

1. INTRODUCTION

In a classical TR device [1, 2, 3], the motion of horizontal (upsetting) tools and the vertical tool (bending tool) are strictly related to one another, which makes the use of complex crank forming technological schemes, and thus, convenient and effective optimization of the forging process, impossible. In relation to this, in the case of crankshafts of newer design with a more complex shape of crank arms, this technology exhibits significant inconveniences: it is difficult to obtain good filling of the upper parts of arms, and particularly corners. This leads to the necessity of using high technological allowances that ensure achievement of the proper product shape.

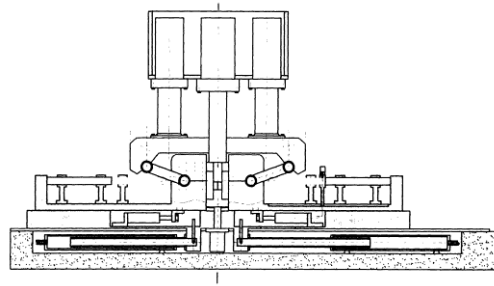


Rys. 1. Schematy urządzeń kuźniczych: a) TR, b) N-TR i c) RR [4]

Fig. 1. Schematic of RR forging devices: a) TR, b) N-TR and c) [4]

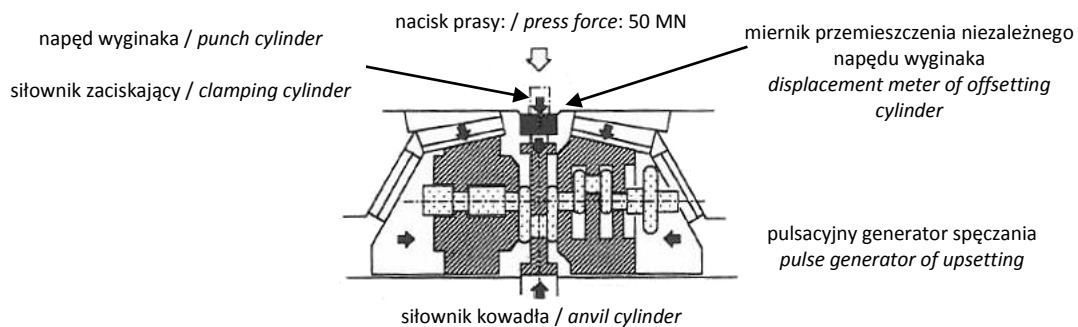
Użytkownicy zarówno urządzenia TR, jak i RR próbowali wprowadzić niezależny ruch wyginaka (rys. 1) Próby takie przedstawiono w opisie chińskiego patentu [5] dla urządzenia TR, nazwanego przez twórców patentu N-TR (rys. 2), oraz w pracy [6] dla urządzenia NRR (rys. 3).

Users of both TR and RR devices attempted to introduce independent bending tool motion (Fig. 1). Such attempts are described in the Chinese patent [5] for a TR device called N-TR by the patent's authors (Fig. 2) as well as in work [6] for an NRR device (Fig. 3).



Rys. 2. Urządzenie N-TR według China Patent Application No. 2005100013222.8 (2006) [5]

Fig. 2. N-TR forging device according to China Patent Application No. 2005100013222.8 (2006) [5]



Rys. 3. Projekt urządzenie kuźniczego NRR w Kobe Steel Ltd. (1991) [6]

Fig. 3. Design of forging device NRR by Kobe Steel Ltd. (1991) [6]

Pokazana na rys. 3 propozycja udoskonalonego urządzenia RR, nazwanego NRR, powstała w Kobe Steel Ltd. [6]. Do urządzenia NRR współpracującego z prasą o nacisku 50 MN (N_p) przewidziano napęd wyginaka o nacisku 10 MN. Nacisk okazał się niewystarczający dla utrzymania wyginaka w pozycji pracy. Zarówno w urządzeniu NRR, jak i N-TR mechaniczne powiązanie spęszczania z wyginaniem zostało zlikwidowane dzięki zastosowaniu niezależnego ruchu wyginaka napędzanego siłownikiem hydraulicznym. Symulację MES kucia metodą N-TR opisano w pracy [7].

The proposal of an improved RR device called NRR shown in Fig. 3 was created at Kobe Steel Ltd. [6]. A bending tool drive with 10 MN pressing force was planned for the NRR device cooperating with a press with 50 MN pressing force (N_p). This pressing force proved insufficient for maintaining the bending tool in working position. The mechanical linkage between upsetting and bending was eliminated in both the NRR and N-TR device thanks to the application of independent motion of the bending tool driven by a hydraulic actuator. FEM simulation of forging using the N-TR method is described in work [7].

2. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE URZĄDZENIA KUŹNICZEGO N-TR36

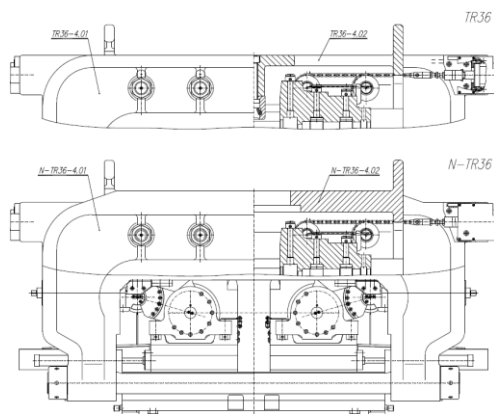
Zasadnicza różnica między urządzeniem kuźniczym typu N-TR, a klasycznym urządzeniem TR polega na wprowadzeniu niezależnego napędu wyginaka wchodzącego w skład prasy kuźniczej współpracującej z urządzeniem N-TR. Różnicę w konstrukcji urządzenia N-TR36 i klasycznego urządzenia TR36 pokazano na rys. 4. W celu umożliwienia współpracy urządzenia

2. DESIGN ASSUMPTIONS OF N-TR36 FORGING DEVICE

The essential difference between an N-TR forging device and a classical TR device is based on the introduction of an independent drive for the bending tool entering into the composition of the forging press inter-operating with the N-TR device. Differences in the design of the N-TR36 device and classical TR36 device are shown in Fig. 4. In order to enable cooperation of the N-

N-TR36 z niezależnym napędem wyginaka przekonstruowano głowicę urządzenia. Poprzeczka TR36-4.02 została wzmocniona ze względu na konieczność zaprojektowania dużego otworu umożliwiającego działanie napędu wyginaka, w związku z czym górne elementy belek TR36-4.01 zostały także odpowiednio pogrubione.

TR36 device with the independent bending tool drive, the device head was redesigned. The cross-bar of TR36-4.02 was reinforced due to the necessity of designing a large hole enabling operation of the bending tool drive, and in relation to this, the upper elements of the beams of TR36-4.01 were also made thicker, as appropriate.



Rys. 4. Urządzenie kuznicze TR36 i urządzenie adaptowane do wersji N-TR36

Fig. 4. TR36 forging device and forging device adjusted to N-TR36 type

Urządzenie kuznicze N-TR36 przeznaczone jest do współpracy z prasą hydrauliczną o nacisku 24 MN. Nacisk prasy 24 MN dla urządzenia N-TR36 jest równoważny naciskowi prasy 36 MN dla klasycznego urządzenia TR36. Wynika to stąd, że urządzenie TR36 dedykowane jest do pracy z prasą o nacisku 36 MN. W czasie kucia wykorbienia wyginak przejmuje znaczną część nacisku prasy, w zależności od kształtu wykorbienia od 40 do nawet 60%. Zatem ze względów wytrzymałościowych, urządzenie N-TR36 może współpracować z prasą o odpowiednio mniejszym nacisku. Mniejszy nacisk prasy rekompensuje brak odciążenia ze strony wyginaka. Asortyment kutych wałów pozostaje bez zmian, a wały można wykonać, korzystając z prasy o mniejszym nacisku, wyposażonej w niezależny napęd wyginaka.

The N-TR36 forging device is intended for inter-operation with a hydraulic press with 24 MN pressing force. A press force of 24 MN for the N-TR36 device is equivalent to a press force of 36 MN for the classical TR36 device. This results from the fact that the TR36 device is dedicated for operation with a press with 36 MN press force. During forging of a crank, the bending tool carries a significant part of the press force, ranging from 40 to 60% depending on the crank shape. This, for strength reasons, the N-TR36 device must cooperate with a press with accordingly lesser pressing force. Lower press force compensates for the lack of counterbalancing of force from the bending tool. The assortment of forged crankshafts remains unchanged by the fact that crankshafts can be produced using a press of lower pressing force equipped with an independent bending tool drive.

3. OBLICZANIE SIŁ SPĘCZAJĄCYCH DLA URZĄDZENIA TR36

Przebieg nominalnej siły spęczającej P_n działającej między zespołami obudów narzędziowych w funkcji kąta pochylecia łączników α dla

3. CALCULATION OF UPSETTING FORCES FOR TR36 DEVICE

The progression of nominal upsetting force P_n , acting between the die holders fronts, as a function of swivel toggles inclination angle α for the

urządzenia TR36 pokazano na rys. 5. Maksymalna wartość siły spęczającej, która jest proporcjonalna do maksymalnego dopuszczalnego nacisku prasy dla danego urządzenia, wynosi 45 MN dla urządzenia TR36. Dane do wykresu wykonanego dla maksymalnej wartości nacisku prasy (36 MN) obliczono zgodnie ze wzorem:

$$P_h = 0,5 N_p [\text{ctg}(\alpha + \rho) - \mu_s] \quad (1)$$

gdzie:

P_h – pozioma siła spęczająca,

N_p – nacisk prasy ($N_p = 36$ MN),

α – kąt pochylenia łącznika ($\alpha = 62^{\circ} \div 16^{\circ}$),

μ_s – współczynnik tarcia między dolnymi obudowami narzędzi, a płytami ślizgowymi prowadnic podstawy urządzenia ($\mu_s = 0,1 \div 0,15$).

$$\rho = \arcsin \frac{2r_t}{L} \quad (2)$$

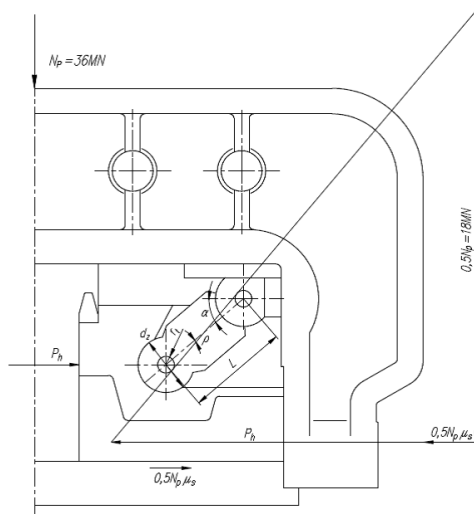
gdzie:

$r_t = 0,5 d_z \mu_z$ – promień koła tarcia,

d_z – średnica wałka łożyskowego ($d_z = 370$ mm),

L – odległość osi wałków łożyskowych ($L = 675$ mm),

μ_z – współczynnik tarcia między parami trącymi łącznika ($\mu_z = 0,1$).



Rys. 5. Sposób obliczania i przebieg nominalnej siły spęczającej P_h dla urządzenia kuzniczego TR36

Fig. 5. The way of calculation and diagram of nominal upsetting force P_h for TR36 forging device

Na rys. 5 przedstawiono sposób obliczania siły spęczającej P_h dla przypadku, gdy w urządzeniu wykonuje się tylko spęczanie, np. kołnierza wału. Dla przypadku kucia wykorbienia wału obowiązuje poniższy wzór, uwzględniający działanie wyginaka:

TR36 device is shown in Fig. 5. The maximum value of upsetting force, which is proportional to the maximum acceptable pressing force for a given device amounts to 45 MN for the TR36 forging device. Data for the chart made for maximum press force value (36 MN) was calculated according to the formula:

$$P_h = 0,5 N_p [\text{ctg}(\alpha + \rho) - \mu_s] \quad (1)$$

where:

P_h – horizontal upsetting force,

N_p – press force ($N_p = 36$ MN),

α – swivel toggle inclination angle ($\alpha = 62^{\circ} \div 16^{\circ}$),

μ_s – friction coefficient between the bottom die holders and slide plates of guides on the device's base ($\mu_s = 0.1 \div 0.15$).

$$\rho = \arcsin \frac{2r_t}{L} \quad (2)$$

where:

$r_t = 0.5 d_z \mu_z$ – radius of friction circle,

d_z – diameter of bearing shaft ($d_z = 370$ mm),

L – distance from axes of bearing shafts ($L = 675$ mm),

μ_z – friction coefficient between swivel toggle's friction pairs ($\mu_z = 0.1$).

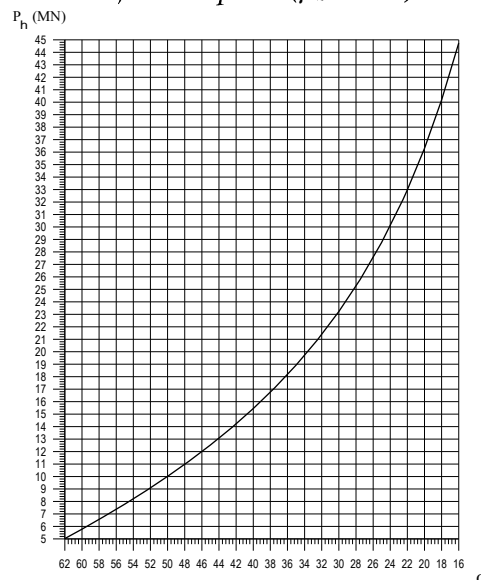


Fig. 5 presents the method of calculating upsetting force P_h for the case where only upsetting is performed on the device, e.g. shaft flange. In the case of forging of a crank throw, the following formula, accounting for the bending tool's action, is applicable:

$$P_{h_wykorbienia} = 0,5 N_p (1 - \eta) [\text{ctg}(\alpha + \rho) - \mu_k] \quad (3)$$

gdzie:

$P_{h_wykorbienia}$ – siła spęczająca ramię wykorbienia,
 N_p – nacisk prasy,
 P_w – siła wyginająca (przesadzająca) wykorwienie (działanie wyginaka),
 $\eta = P_w / N_p$ – przyjmuje wartości $0,4 \div 0,6$ proporcjonalnie dla wałów typu L÷V.

4. ANALIZA ROZKŁADU SIŁ PODCZAS KUCIA WYKORBIENIA W URZĄDZENIACH TR I N-TR

Kucie wykorbienia w urządzeniach typu TR i N-TR istotnie się różni. W klasycznym urządzeniu przebiega jednoetapowo (rys. 6), natomiast w urządzeniu N-TR kucie wykorbienia przebiega w dwóch etapach (rys. 7) [7].

Analizę rozkładu sił podczas kucia wykorbień przeprowadzono w programie QForm 3D v. 5.1. Przedmiotem symulacji było kucie wykorbienia typu V (szerszy wyginak). Ten typ wykorbienia wybrano dlatego, że podczas jego kucia wartość η (3) jest większa niż dla wykorbień typu L (węższy wyginak).

$$P_{h_crank} = 0,5 N_p (1 - \eta) [\text{ctg}(\alpha + \rho) - \mu_k] \quad (3)$$

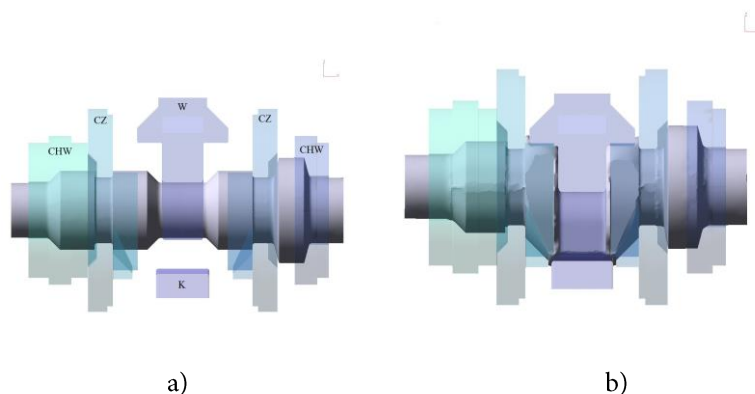
where:

P_{h_crank} – upsetting force for forging crank web,
 N_p – press force,
 P_w – force for bending tool (bending tool action),
 $\eta = P_w / N_p$ – accepts values $0.4 \div 0.6$ proportionally for L÷V type shafts.

4. FORCE DISTRIBUTION ANALYSIS DURING CRANK THROW FORGING IN TR AND N-TR DEVICES

Forging of a crank throw in TR and N-TR devices differs significantly. In the classical device, the process is performed in a single stage (Fig. 6), while crank forging in an N-TR device takes place in two stages (Fig. 7). [7].

Force distribution analysis during crank forging was conducted using QForm 3D v. 5.1 software. The object of simulation was forging of a V-crank (wider bending tool). This type of crank was selected because, during its forging, the η value (3) is greater than for L-cranks (more narrow bending tool).



Rys. 6. Kucie wykorbienia w klasycznym urządzeniu kuźniczym TR
 a) wyjściowe położenie narzędzi, b) końcowe położenie narzędzi;
 W – wyginak; CZ – wkładka czołowa; CHW – wkładka chwytna; K – kowadło

Fig. 6. Crank throw forging in conventional TR forging device

a) start tools position, b) end tools position;

W – bending tool; CZ – face die inserts; CHW – clamping die inserts; K – anvil

Przebieg kucia w klasycznym urządzeniu TR pokazano na rys. 6. W celu łatwego porównania wyników symulacji, w opisie posłużono się wielkościami bezwymiarowymi. W przypadku kucia w klasycznym urządzeniu TR proces przebiega jednoetapowo, stąd pionowa droga wygi-

The forging process in a classical TR device is shown in Fig. 6. Dimensionless quantities were used in the description so that simulation results could be compared more easily. In the case of forging in a classical TR forging device, the process takes place in a single stage, thus, the verti-

naka wyniosła 1 (równa jest całej drodze przeginania), a pozioma droga wkładek kształtujących wyniosła także 1 (równa całej drodze spęczania) (tab. 1).

cal path of the bending tool amounted to 1 (equal to the entire bending path), and the horizontal path of forming inserts also amounted to 1 (equal to the entire upsetting path) (Tab. 1).

Tab. 1. Parametry kucia wykorobienia w klasycznym urządzeniu kuźniczym TR

Tab. 1. Parameters of forging of crank throw in TR conventional forging device

| | Wyginak /Z/ Bending tool /Z/ | Wkładki CHW i CZ /X/ CHW and CZ inserts /X/ |
|--|---------------------------------|--|
| Względna droga narzędzi / Relative tool path | 1 | 1 |

Wyniki symulacji zebrane w tab. 2., pozwalają na określenie proporcji rozkładu nacisku prasy N_p na składową działającą na wyginak P_{ZW} i składową P_{ZPX} potrzebną do uzyskania poziomej siły spęczającej P_h . W przypadku rozpatrywanego wykorobienia typu V kutego w klasycznym urządzeniu TR udział sił składowych jest jednakowy i wynosi $0,5 N_p$.

The results of simulations, compiled in Tab. 2, make it possible to determine the proportions of press force N_p distribution on the component acting on the bending tool P_{ZW} and component P_{ZPX} , which is necessary to obtain horizontal upsetting force P_h . In the case of the studied V-crank forged in a classical TR forging device, the share of component forces is identical and amounts to $0.5 N_p$.

Tab. 2. Rozkład sił na końcu procesu kucia wykorobienia w klasycznym urządzeniu kuźniczym TR

Tab. 2. Force distribution at the end of forging of crank throw in TR conventional forging device

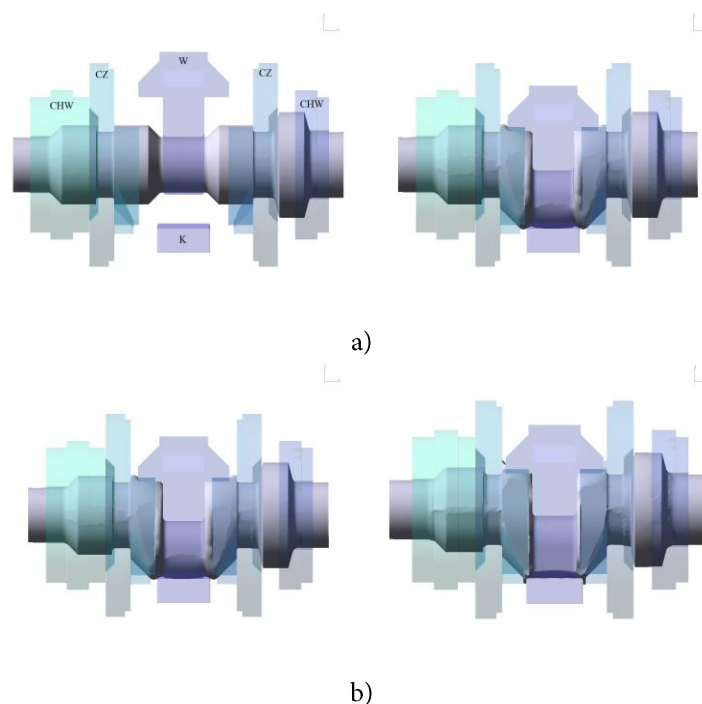
| | P_{X_CHW} | P_{X_CZ} | P_{ZPX} | P_{ZW} | η |
|-------------------------------|--------------|-------------|-----------|----------|--------|
| Siła / N_p Force / N_p | 0,24 | 0,39 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |

$N_p = P_{ZPX} + P_{ZW}$ – nacisk prasy,
 $P_{ZPX} = 2 (P_{X_CHW} + P_{X_CZ}) / [\text{ctg}(\alpha + \rho') - \mu_s]$ – pionowa siła nacisku prasy dająca poziomą siłę spęczającą P_h ,
 $P_h = P_{X_CHW} + P_{X_CZ}$ – pozioma siła spęczająca,
 P_{X_CHW} – pozioma siła działająca na wkładkę chwytową,
 P_{X_CZ} – pozioma siła działająca na wkładkę czołową,
 P_{ZW} – siła nacisku wyginaka.

$N_p = P_{ZPX} + P_{ZW}$ – press force,
 $P_{ZPX} = 2 (P_{X_CHW} + P_{X_CZ}) / [\text{ctg}(\alpha + \rho') - \mu_s]$ – vertical press force causing horizontal upsetting force P_h ,
 $P_h = P_{X_CHW} + P_{X_CZ}$ – horizontal upsetting force,
 P_{X_CHW} – horizontal force acting on clamping tool insert,
 P_{X_CZ} – horizontal force acting on face tool insert,
 P_{ZW} – bending tool pressing force.

Przebieg kucia w urządzeniu N-TR pokazano na rys. 7. W przypadku kucia w urządzeniu N-TR proces przebiega dwuetapowo (tab. 3). W pierwszym etapie pionowa droga wyginaka wyniosła 1 (równa jest całej drodze przeginania), a pozioma droga wkładek kształtujących wyniosła 0,77 drogi spęczania. W drugim etapie wyginak pozostaje nieruchomy, a pozioma droga wkładek kształtujących wyniosła 0,23 drogi spęczania.

The forging process in an N-TR device is shown in Fig. 7. In the case of forging in an N-TR device, the process takes place in two stages (Tab. 3). In the first stage, the bending tool's vertical path amounted to 1 (equal to entire bending path), and the horizontal path of forming inserts amounted to 0.77 of the upsetting path. During the second stage, the bending tool remains immobile, and the horizontal path of forming inserts was equal to 0.23 of the upsetting path.



Rys. 7. Kucie wykorbienia w urządzeniu N-TR: a) położenie narzędzi początkowe i końcowe dla 1 etapu kucia wykorbienia, b) położenie narzędzi początkowe i końcowe dla 2 etapu kucia wykorbienia;

W – wyginak; CZ – wkładka czołowa; CHW – wkładka chwytowa; K – kowadło

Fig. 7. Crank throw forging in N-TR forging device: a) start and end tools position for first stage of forging crank throw, b) start and end tools position for second stage of forging crank throw;

W – bending tool; CZ – face die inserts; CHW – clamping die inserts; K – anvil

Tab. 3. Parametry kucia wykorbienia w urządzeniu kuźniczym N-TR

Tab. 3. Parameters of forging of crank throw in N-TR forging device

| | | Wyginak /Z/ Bending tool /Z/ | Wkładki CHW i CZ /X/ CHW and CZ inserts /X/ |
|-------------------|---|---------------------------------|--|
| 1 etap Stage 1 | Względna droga narzędzi Relative tool path | 1 | 0,77 |
| 2 etap Stage 2 | Względna droga narzędzi Relative tool path | nieruchomy / immobile | 0,23 |

W przypadku rozpatrywanego wykorbienia typu V kutego w urządzeniu N-TR udział sił składowych (tab. 4) różnił się od uzyskanego dla kucia w klasycznym urządzeniu TR (tab. 3).

In the case of the V-crank in question forged in the N-TR device, the proportion of component forces (Tab. 4) differed from that obtained for forging in the classical TR device (Tab. 3).

Tab. 4. Rozkład sił na końcu kucia wykorbienia w urządzeniu kuźniczym N-TR

Tab. 4. Force distribution at the end of forging of crank throw in N-TR forging device

| | | P_{X_CHW} | P_{X_CZ} | P_{ZPX} | P_{ZW} | η |
|------------------|-------------------------------|--------------|-------------|-----------|----------|--------|
| 1 etap / Stage 1 | Siła / N_p Force / N_p | 0,21 | 0,41 | 0,49 | 0,51 | 0,51 |
| 2 etap / Stage 2 | Siła / N_p Force / N_p | 0,25 | 0,44 | 0,55 | 0,45 | 0,45 |

W pierwszym etapie kucia składowa P_{ZW} wynosi $0,51 N_p$, a składowa P_{ZPX} jest równa $0,49 N_p$. W drugim etapie kucia składowa P_{ZW} osiąga wartość $0,45 N_p$, a składowa P_{ZPX} wynosi $0,55 N_p$. Zwraca uwagę duża wartość składowej P_{ZW} wynosząca $0,45 N_p$ w przypadku nieruchomego wyginaka, gdyż intuicyjnie można sądzić, że do utrzymania wyginaka w nieruchomej pozycji potrzebna jest niewielka siła pionowa. Tak sądzili inżynierowie z Kobe Steel Ltd., przedstawiając propozycję udoskonalenia swojego urządzenia NRR [6]. Dla urządzenia NRR współpracującego z prasą o nacisku 50 MN (N_p) przewidziano napęd wyginaka o nacisku 10 MN (P_{ZW}) czyli $0,2$ wartości N_p . W praktyce nacisk okazał się niewystarczający, a potwierdziły to wyniki symulacji. Dla analizowanego przypadku kucia wykorbienia nacisk napędu wyginaka powinien wynieść minimum $16,2 \text{ MN}$ i być równy sile P_{ZW} dla 2 etapu. Uwzględniając, że dla wałów typu V wartość η może osiągnąć nawet $0,6$, napęd wyginaka w przypadku urządzenia N-TR36 powinien mieć nacisk min. 22 MN .

5. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA GŁÓWNYCH CZĘŚCI URZĄDZENIA KUŹNICZEGO N-TR36

Przedmiotem analizy były cztery główne części urządzenia kuźniczego N-TR36 najistotniejsze z punktu widzenia wytrzymałości. Części urządzenia kuźniczego wraz z podaniem własności materiałowych zestawiono w tab. 5. W celach porównawczych przeprowadzono obliczenia dla klasycznego urządzenia TR36, którego urządzenie N-TR36 jest adaptacją. Określono stan naprężeń i przemieszczeń w głównych częściach urządzenia kuźniczego. Na podstawie otrzymanych wyników określono przystosowanie konstrukcji urządzenia do współpracy z niezależnym mechanizmem ruchu wyginaka.

In the first stage of forging, component P_{ZW} amounts to $0.51 N_p$ and component P_{ZPX} is equal to $0.49 N_p$. In the second stage of forging, component P_{ZW} reaches a value of $0.45 N_p$, and component P_{ZPX} is equal to $0.55 N_p$. The high value of component P_{ZW} , amounting to $0.45 N_p$ in the case of an immobile bending tool, because it can intuitively be surmised that a small vertical force is necessary to maintain the bending tool in an immobile position. This is what the engineers at Kobe Steel Ltd. thought when they presented a proposal of an improvement for their NRR device [6]. A bending tool drive with 10 MN pressing force (P_{ZW}), or 0.2 of the N_p value, was planned for the NRR device cooperating with a press with 50 MN pressing force (N_p). In practice, the press force proved insufficient, and this was confirmed by the results of simulation. For the crank forging case subject to analysis, the press force of the bending tool drive should amount to at least 16.2 MN and be equal to the P_{ZW} force in stage 2. Considering that the η value may reach up to 0.6 for V-crankshafts, the bending tool drive in the N-TR36 device should have a press force of at least 22 MN .

5. STRENGTH ANALYSIS OF THE PRIMARY PARTS OF THE N-TR36 FORGING DEVICE

The four primary parts of the N-TR36 forging device that are most significant from a strength perspective were the subject of analysis. Forging device parts and specifications of material properties are compiled in Tab. 5. To provide a comparison, calculations were performed for the classical TR36 device, of which the N-TR36 device is an adaptation. The state of stresses and displacements in the primary parts of the forging device was determined. Based on obtained results, the adaptation of the device's design for cooperation with the independent bending tool motion mechanism was determined.

Tab. 5. Główne części urządzenia kuźniczego N-TR36 i ich własności materiałowe

Tab. 5. Main parts of N-TR36 forging device and their material characteristics

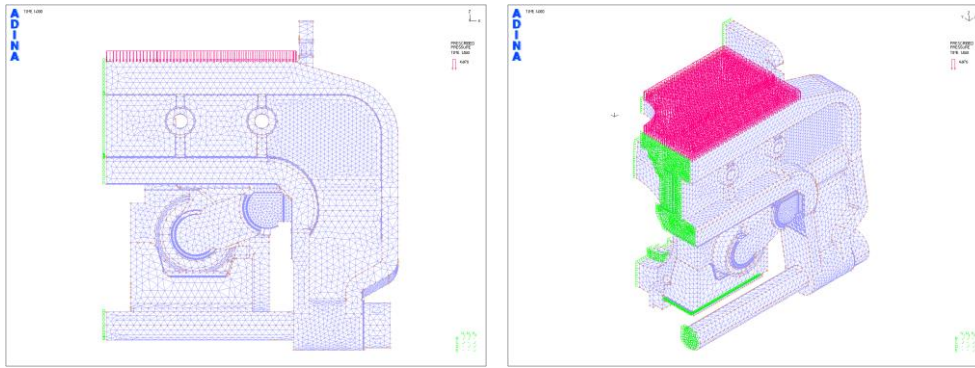
| Lp. No. | Nazwa Name | Wytrzymałość na rozciąganie R_m Tensile strength R_m | Granica plastyczności (min.) R_e Yield point (min.) R_e | Wydłużenie (min.) A Elongation (min.) A | Udarność (min.) KCV Impact strength (min.) KCV | Moduł Younga E Young's module E | Współczynnik Poissona ν Poisson's ratio ν |
|------------|---|---|---|--|--|--|--|
| | | MPa | MPa | % | J/cm ² | MPa | — |
| 1 | Dolna obudowa narzędzi Bottom die holder | 700–800 | 450 | 12 | 35 | 210 000 | 0,3 |
| 2 | Górna obudowa narzędzi Top die holder | 700–800 | 450 | 12 | 35 | 210 000 | 0,3 |
| 3 | Belka Beam | 700–800 | 450 | 12 | 35 | 210 000 | 0,3 |
| 4 | Poprzeczka Cross-bar | 600–700 | 350 | 14 | 30 | 210 000 | 0,3 |

Analizę przeprowadzono metodą elementów skończonych (MES) za pomocą programu ADINA. Analizowano całe urządzenie jednocześnie. Ze względu na symetrię zarówno geometrii urządzenia, jak i obciążenia modelowano ćwiartkę urządzenia. Przeprowadzono obliczenia dla dwóch urządzeń: N-TR36 i TR36. Porównano wyniki obliczeń.

Urządzenia zostały obciążone siłą 36 MN rozłożoną w formie obciążenia ciągłego na powierzchniach mających styczność z poprzeczką prasy (na górnej powierzchni poprzeczki i górnych powierzchni półek belek). Ponieważ powierzchnie te różnią się dla analizowanych urządzeń, obciążenie ciągłe dla urządzenia N-TR36 wynosi 4,97 MPa, a dla urządzenia TR36 jest równe 6 MPa. Urządzenia analizowano w końcowej fazie pracy (tzw. położeniu zamkniętym urządzenia), gdy łączniki są nachylone pod kątem 16° do poziomu. W tym położeniu na elementy urządzenia działają największe siły, czyli urządzenie jest najbardziej obciążone. Model MES urządzenia N-TR36 pokazano na rys. 8, a urządzenia TR36 na rys. 9.

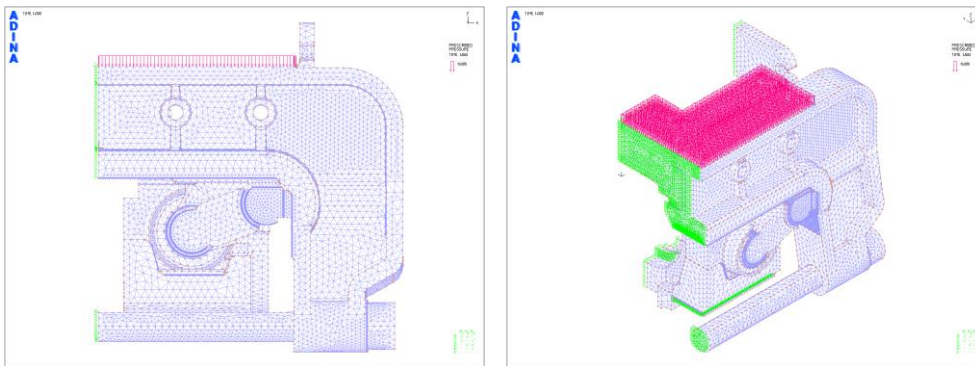
Analysis was conducted using the finite element method by means of ADINA software. The entire device was analyzed at once. Due to the symmetry of both the device's geometry and load, a quarter of the device was modeled. Calculations were performed for two devices: N-TR36 and TR36. Results of calculations were compared.

Devices were put under a load of 36 MN, distributed in the form of a continuous load on surfaces coming into contact with the press cross-beam (on the top surface of the crossbar and top surfaces of beam flanges). Because these surfaces differ between the devices subject to analysis, the continuous load for the N-TR36 device amounts to 4.97 MPa, and for the TR36 device, 6 MPa. Devices were analyzed in the final phase of work (so-called closed position of device), when swivel toggles were inclined at an angle of 16° to the horizontal. The largest forces act on device elements in this position, meaning that the device is subjected to the greatest load. The FEM model of the N-TR36 device is shown in Fig. 8, and of the TR36 model in Fig. 9.



Rys. 8. Model MES urządzenia kuźniczego N-TR36 wraz z siatką elementów skończonych, obciążeniem i warunkami brzegowymi

Fig. 8. FEM model of N-TR36 forging device with meshing, load and boundary conditions



Rys. 9. Model MES klasycznego urządzenia kuźniczego TR36 wraz z siatką elementów skończonych, obciążeniem i warunkami brzegowymi

Fig. 9. FEM model of TR36 TR conventional forging device with meshing, load and boundary conditions

Model urządzenia N-TR36 zbudowano z 224380, a model TR36 z 181267 elementów czworościennych 10-węzłowych. W płaszczyźnie symetrii yz zablokowano przemieszczenia w kierunku x , a w płaszczyźnie xz zablokowano przemieszczenia w kierunku y . Dodatkowo zablokowano przemieszczenie w kierunku x na powierzchni wewnętrznej wytoczenia pod czołową wkładkę narzędziową. Przemieszczenia pionowe zablokowano na powierzchni płytki ślizgowej dolnej obudowy narzędzi (powierzchnia równoległa do płaszczyzny xy).

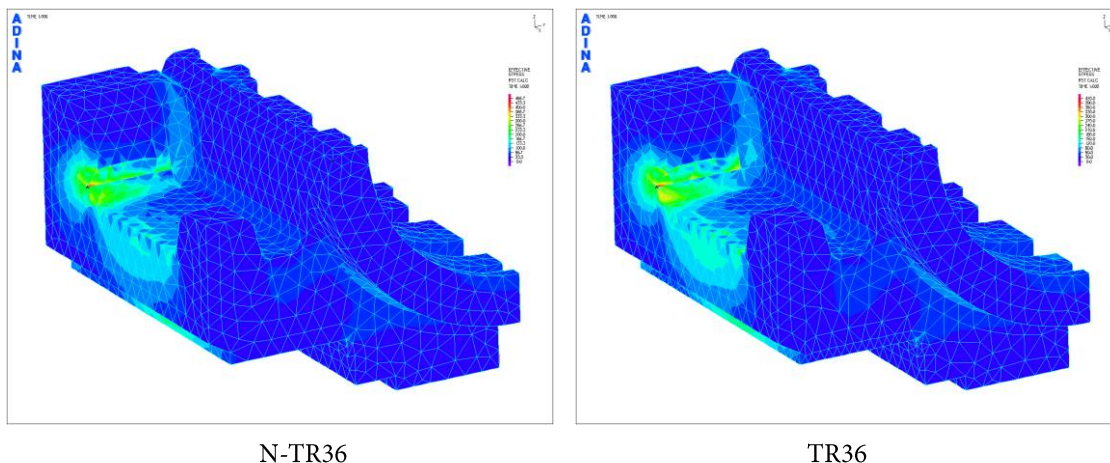
5.1. Wyniki analizy wytrzymałościowej – stan naprężenia

Rozkłady stanów naprężeń zredukowanych σ_{red} według hipotezy Hubera w analizowanych głównych częściach urządzeń kuźniczych N-TR36 i TR36 pokazano na rys. 10–13.

The model of the N-TR36 device was built of 224380 and the TR36 model of 181267 10-noded tetrahedral elements. Displacements in the x direction were blocked on the yz plane of symmetry, and displacements in the y direction were blocked on the xz plane. In addition, displacement in the x direction was blocked on the surface of the interior chamber under the face tool insert. Vertical displacements z were blocked on the surface of the bottom sliding plate of the bottom tool housing (surface parallel to xy plane).

5.1. Results of strength analysis – stress state

Distributions of reduced stress states σ_{red} according to the Huber hypothesis in analyzed primary parts of N-TR36 and TR36 forging devices are shown in Fig. 10 to 13.



Rys. 10. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_{red} w dolnych obudowach narzędzi

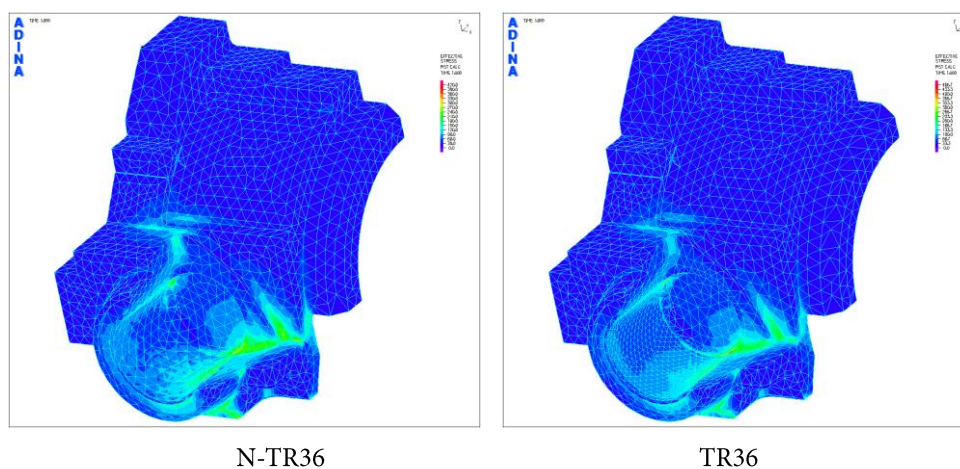
Fig. 10. Stress intensity σ_{red} distribution in bottom die holders

Charakter rozkładu naprężeń w dolnych obudowach narzędzi jest zbliżony. Maksymalne naprężenia zredukowane wynoszą:

- w dolnej obudowie narzędzi N-TR36-2.01 – 450 MN,
- w dolnej obudowie narzędzi TR36-2.01 – 420 MN.

The character of stress distribution is similar in the bottom die holders. Maximum reduced stresses amount to:

- *in the bottom die holders of N-TR36-2.01 – 450 MN,*
- *in the bottom die holders of TR36-2.01 – 420 MN.*



Rys. 11. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_{red} w górnych obudowach narzędzi

Fig. 11. Stress intensity σ_{red} distribution in top die holders

Podobnie jak poprzednio, charakter rozkładu naprężeń w górnych obudowach narzędzi jest bardzo zbliżony, a maksymalne naprężenia zredukowane wynoszą:

- w górnej obudowie narzędzi N-TR36-3.01 – 420 MN,
- w górnej obudowie narzędzi TR36-3.01 – 460 MN.

Similarly as before, the character of stress distribution in top die holders is very similar, and maximum reduced stresses amount to:

- *in the top die holding of N-TR36-3.01 – 420 MN,*
- *in the top die holding of TR36-3.01 – 460 MN.*

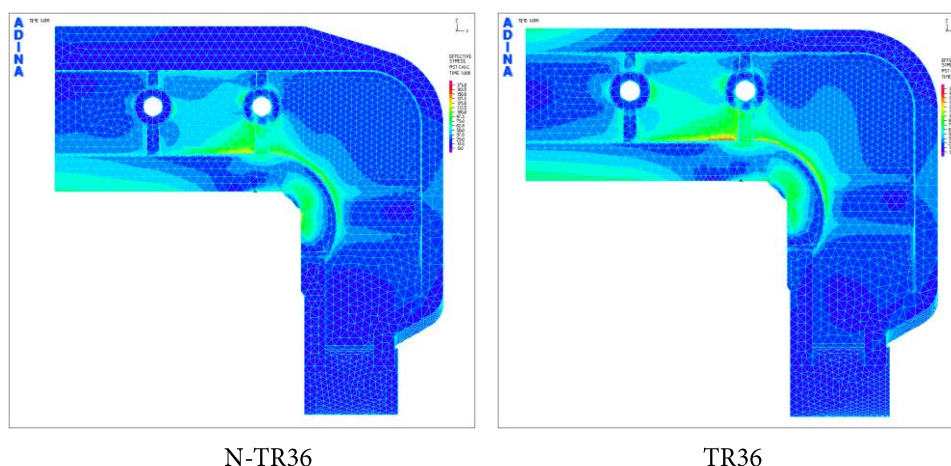
Rys. 12. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_{red} w belkach

Fig. 12. Stress intensity σ_{red} distribution in beams

Charakter rozkładu naprężeń w belkach jest zbliżony do siebie. Maksymalne naprężenia zredukowane wynoszą:

- w belce N-TR36-4.01 – 180 MN,
- w belce TR36-4.01 – 210 MN.

The character of stress distribution in beams is similar. Maximum reduced stresses amount to:

- *in beam of N-TR36-4.01 – 180 MN,*
- *in beam of TR36-4.01 – 210 MN.*

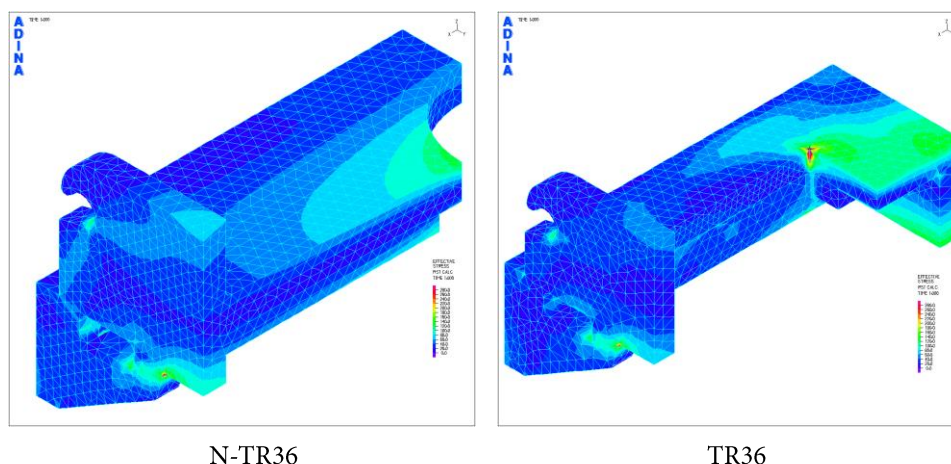
Rys. 13. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_{red} w poprzeczkach

Fig. 13. Stress intensity σ_{red} distribution in cross-bars

Ze względu na różnice w konstrukcji, charakter rozkładu naprężeń w poprzeczkach różni się w pewnych obszarach. Naprężenia w przypadku urządzenia TR36 są większe niż dla urządzenia N-TR36. Maksymalne naprężenia zredukowane wynoszą:

- w poprzeczce N-TR36-4.02 – 280 MN,
- w poprzeczce TR36-4.02 – 330 MN.

Due to differences in design, the character of stress distribution in crossbars differs in certain areas. Stresses are greater for the TR36 device than for the N-TR36 device. Maximum reduced stresses amount to:

- *in crossbar of N-TR36-4.02 – 280 MN,*
- *in crossbar of TR36-4.02 – 330 MN.*

5.2. Wyniki analizy wytrzymałościowej – stan przemieszczeń i deformacji

Rozkłady przemieszczeń wypadkowych w głównych częściach urządzeń kuźniczych N-TR36 i TR36 pokazano na rys. 14–17. Przemieszczenia na rysunkach zostały wielokrotnie powiększone w celu uwidocznienia deformacji części na tle zarysu części przed odkształceniem. W tab. 6–9 porównano wartości ekstremalnych przemieszczeń występujących w głównych częściach urządzeń.

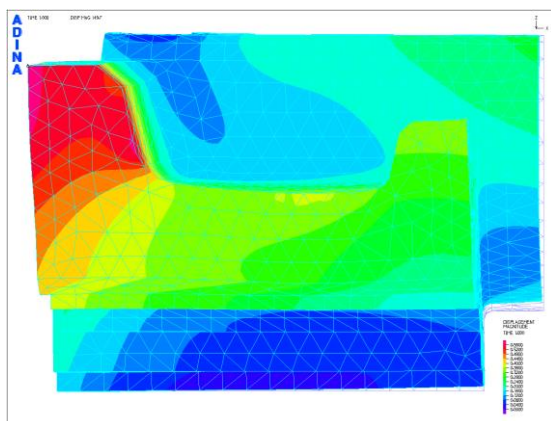
5.2. Results of strength analysis – state of displacements and deformations

Distributions of resultant displacements in the primary parts of forging devices N-TR36 and TR36 are shown in Fig. 14 to 17. Displacements were magnified multiple times on figures in order to show deformations of parts on the background of the part outline before deformation. In Tab. 6–9, the values of extreme displacements occurring in the main parts of the devices have been compared.

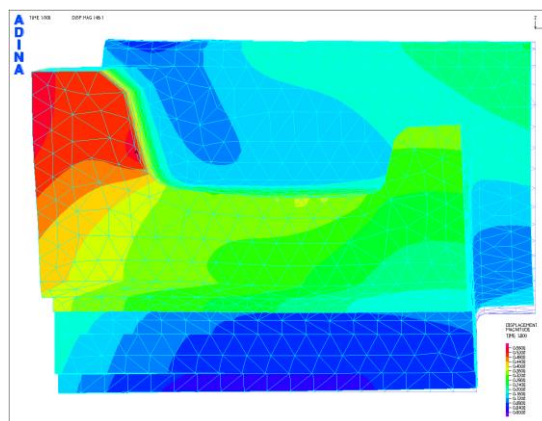
Tab. 6. Porównanie ekstremalnych przemieszczeń dolnych obudów narzędzi

Tab. 6. Comparison of extreme displacements of bottom die holders

| | N-TR36 | | TR36 | |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | min. /mm/ | max /mm/ | min. /mm/ | max /mm/ |
| u_x | -0,568 | 0,013 | -0,538 | 0,013 |
| u_y | -0,234 | 0,258 | -0,227 | 0,244 |
| u_z | -0,235 | 0,168 | -0,243 | 0,160 |
| wypadkowe / resultant | | 0,560 | | 0,544 |



N-TR36



TR36

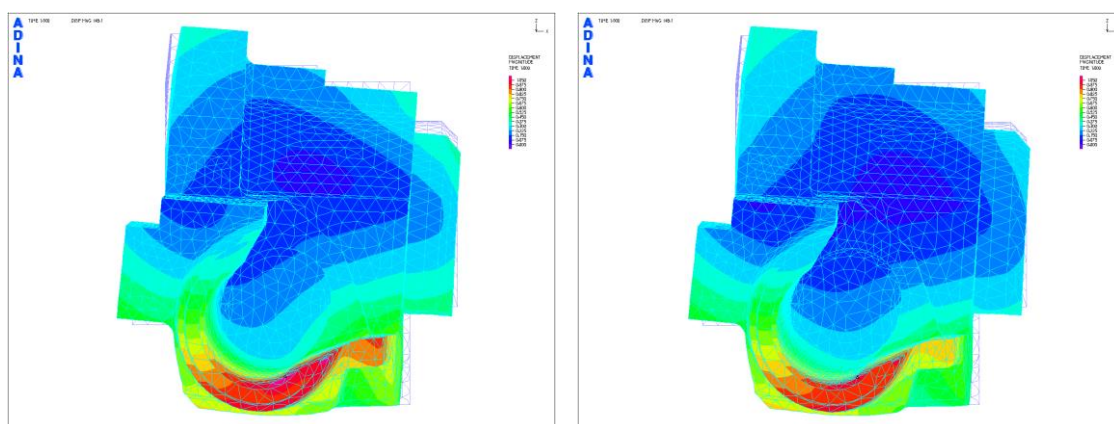
Rys. 14. Rozkład przemieszczeń wypadkowych dolnych obudów narzędzi

Fig. 14. Displacement magnitude distribution in bottom die holders

Tab. 7. Porównanie ekstremalnych przemieszczeń górnych obudów narzędzi

Tab. 7. Comparison of extreme displacements of top die holders

| | N-TR36 | | TR36 | |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | min. /mm/ | max /mm/ | min. /mm/ | max /mm/ |
| u_x | -0,897 | 0,286 | -0,842 | 0,265 |
| u_y | -0,595 | 0,347 | -0,458 | 0,427 |
| u_z | -0,626 | 0,290 | -0,638 | 0,308 |
| wypadkowe / resultant | | 1,080 | | 1,019 |



N-TR36

TR36

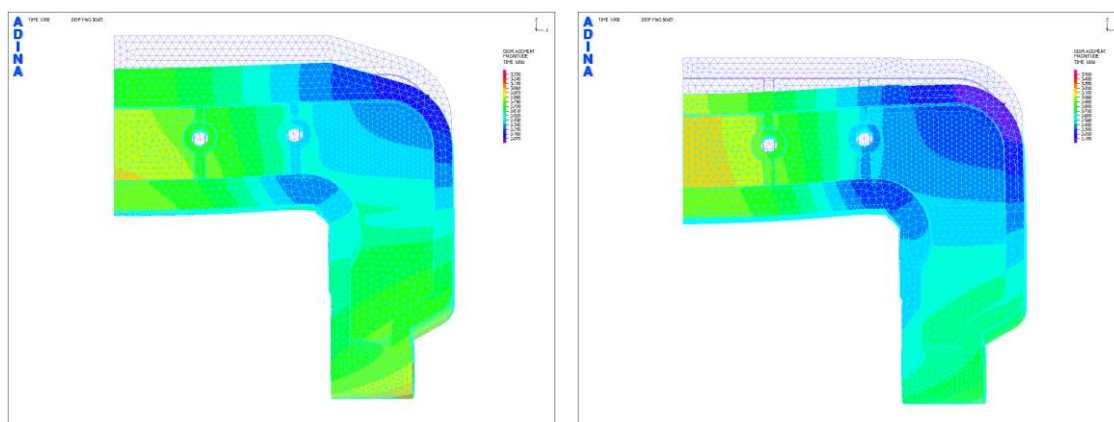
Rys. 15. Rozkład przemieszczeń wypadkowych górnych obudów narzędzi

Fig. 15. Displacement magnitude distribution in top die holders

Tab. 8. Porównanie ekstremalnych przemieszczeń belek

Tab. 8. Comparison of extreme displacements of beams

| | N-TR36 | | TR36 | |
|-----------------------|-----------|----------|----------|----------|
| | min. /mm/ | max /mm/ | min /mm/ | max /mm/ |
| u_x | -0,119 | 0,339 | -0,181 | 0,328 |
| u_y | -2,186 | 0,152 | -2,012 | 0,221 |
| u_z | -3,245 | -2,078 | -3,533 | -1,996 |
| wypadkowe / resultant | | 3,331 | | 3,592 |



N-TR36

TR36

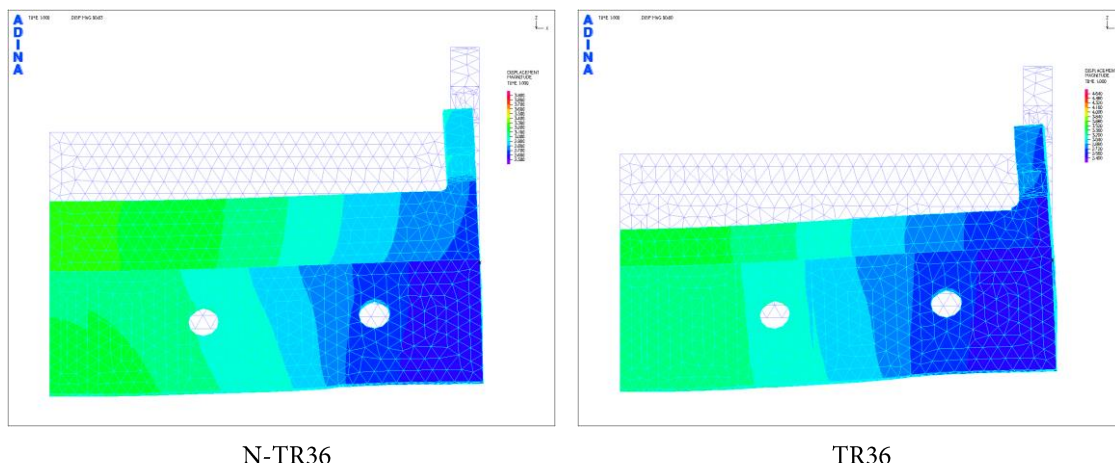
Rys. 16. Rozkład przemieszczeń wypadkowych belek

Fig. 16. Displacement magnitude distribution in beams

Tab. 9. Porównanie ekstremalnych przemieszczeń poprzeczek

Tab. 9. Comparison of extreme displacements of cross-bars

| | N-TR36 | | TR36 | |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | min. /mm/ | max /mm/ | min. /mm/ | max /mm/ |
| u_x | -0,363 | 0,205 | -0,435 | 0,236 |
| u_y | -0,778 | 0,192 | -0,591 | 0,333 |
| u_z | -3,992 | -2,469 | -4,628 | -2,402 |
| wypadkowe / resultant | | 3,992 | | 4,640 |



N-TR36

TR36

Rys. 17. Rozkład przemieszczeń wypadkowych poprzeczki

Fig. 17. Displacement magnitude distribution in cross-bars

Analiza stanu naprężeń wykazała, że zmiana konstrukcji głowicy w urządzeniu N-TR36 nie zmieniła stanu naprężenia panującego w dolnych i górnych obudowach narzędzi, natomiast korzystnie wpłynęła, obniżając maksymalne naprężenia w elementach głowicy: belkach i poprzeczce.

Analiza stanu przemieszczeń i deformacji wykazała, że wprowadzone zmiany konstrukcji głowicy korzystnie wpłynęły na sztywność belek i poprzeczki, a tym samym na sztywność całego urządzenia.

Analysis of the stress state showed that a change of the N-TR36 device head design did not change the stress state of the bottom and top die holders, however it had a positive impact reducing maximum stresses in head components: beams and crossbar.

Analysis of the state of displacements and deformations showed that introduced changes to head design had a favorable impact on the rigidity of beams and the crossbar, and thus, on the rigidity of the entire device.

6. WNIOSKI

1. Symulacja MES prowadzona za pomocą programu QForm wykazała, że dla urządzenia NRR siła potrzebna do utrzymania wyginaka w pozycji pracy jest dużo większa niż spodziewana. W Kobe Steel Ltd. dla urządzenie NRR współpracującego z prasą o nacisku 50 MN (N_p) przewidziano napęd wyginaka o nacisku 10 MN (P_{ZW}) czyli 0,2 N_p . Nacisk okazał się niewystarczający. Potwierdziły to przedstawione wyniki obliczeń, gdyż dla analizowanego przypadku kucia wykorbienia nacisk powinien wynosić minimum 16,2 MN, czyli 0,45 N_p . Uwzględniając, że dla wałów typu V wartość η może osiągnąć nawet 0,6, nacisk napędu wyginaka w przypadku urządzenia N-TR36 powinien wynosić minimum 22 MN.

6. CONCLUSIONS

1. FEM simulation conducted using QForm software showed that for an NRR device, the force required to maintain the bending tool in working position is much greater than expected. A bending tool drive with 10 MN pressing force (P_{ZW}), or 0.2 of the N_p value, was planned for an NRR device cooperating with a press with 50 MN pressing force (N_p) at Kobe Steel Ltd. This press force proved insufficient. This was confirmed by presented results of calculations, because for the analyzed crank throw forging case, the pressing force should be at least 16.2 MN, or 0.45 of the N_p value. Considering that the η value may reach up to 0.6 for V-crankshafts, the bending tool drive in the N-TR36 device should have a press force of at least 22 MN.

2. W celu umożliwienia zastosowania niezależnego mechanizmu ruchu wyginaka w pracy klasycznego urządzenia TR, wprowadzono zmiany kształtu poprzeczki i belek głowicy urządzenia kuźniczego. Przeprowadzone obliczenia MES konstrukcji urządzenia N-TR36 w programie ADINA wykazały, że wprowadzone zmiany wpłynęły pozytywnie na sztywność i wytrzymałość urządzenia.
3. Klasyczne urządzenie TR36 dedykowane jest do pracy z prasą o nacisku 36MN. W czasie kucia wykorbienia wyginak przejmuje znaczną część nacisku prasy (w zależności od kształtu wykorbienia od 40 do nawet 60%) w związku z czym urządzenie N-TR36 może współpracować z prasą o odpowiednio mniejszym nacisku rzędu 24 MN. Mniejszy nacisk prasy rekompensuje brak odciążenia ze strony wyginaka. Natomiast asortyment kutych wałów pozostaje bez zmian, co oznacza, że wały można wykonać, korzystając z prasy o mniejszym nacisku.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy statutowej Instytutu Obróbki Plastycznej w Poznaniu BO 901 29 01 pt. „Opracowanie projektu wstępnego konstrukcji nowego urządzenia kuźniczego do kucia wałów korbowych”.

LITERATURA

- [1] Rut T., Haliasz J.: *Przegląd i ocena nowoczesnych metod kucia ciężkich wałów korbowych*. *Obróbka Plastyczna* t. VII z. 4 (1968), s. 301–327.
- [2] Rut T., Walczyk W., Harabasz W.: *Implementation of the improved TR-method of forging crankshafts*. Proceedings IFM 2003 Japan, Kobe City, October 26–29, 2003, s. 416–422.
- [3] Walczyk W., Milenin A., Pietrzyk M.: *Computer Aided Design of New Forging Technology for Crank Shafts*. *Steel Research International* vol. 82 issue 3 (March 2011), s. 187–194.
- [4] Shirgaokar M., Epp G., Nystrom J., Taylor B., *Continuous Grain Flow (CGF) Forging Crankshafts on a Multi-Directional Press*. Proceedings of the

2. In order to enable application of an independent bending tool motion mechanism in the operation of a classical TR device, changes were made to the shape of the crossbar and beams in the head of the forging device. Conducted FEM calculations of the N-TR36 device design using ADINA software showed that introduced changes had a favorable impact on the rigidity and strength of the device.
3. The classical TR36 device is dedicated for operation with a press with 36MN press force. During crank forging, the bending tool carries a significant part of the press force (from 40 to 60% depending on the crank throw shape), and because of this, the N-TR36 device can cooperate with a press with an appropriately lower press force, on the order of 24 MN. Lower press force compensates for the lack of counterbalancing of force from the bending tool. However, the assortment of forged crankshafts remains unchanged, meaning that crankshafts can be made using a press with lower press force.

ACKNOWLEDGEMENTS

The studies have been realized within the framework of statutory work BO 901 29 01 of the Metal Forming Institute in Poznan, entitled “Opracowanie projektu wstępnego konstrukcji nowego urządzenia kuźniczego do kucia wałów korbowych”.

REFERENCES

- [1] Rut T., Haliasz J.: *Przegląd i ocena nowoczesnych metod kucia ciężkich wałów korbowych*. *Obróbka Plastyczna* vol. VII no. 4 (1968), pp. 301–327.
- [2] Rut T., Walczyk W., Harabasz W.: *Implementation of the improved TR-method of forging crankshafts*. Proceedings IFM 2003 Japan, Kobe City, October 26–29, 2003, pp. 416–422.
- [3] Walczyk W., Milenin A., Pietrzyk M.: *Computer Aided Design of New Forging Technology for Crank Shafts*. *Steel Research International* vol. 82 issue 3 (March 2011), pp. 187–194.
- [4] Shirgaokar M., Epp G., Nystrom J., Taylor B., *Continuous Grain Flow (CGF) Forging Crankshafts on a Multi-Directional Press*. Proceedings of the

- 18th International Forgemasters Meeting, 12–15 September 2011, Pittsburgh, USA, s. 313–319.
- [5] Patent: China Patent Application No. 2005100013222.8 /CN 1836804 A/
- [6] Araki S., Ochi T., Fujita H., Hirano, Takahara H., *New Forging process for Continuous Grain Flow Crankshaft in Upsetting and Offsetting Operation*. Proceedings of the 11th International Forgemasters Meeting, June 1991, Terni, Italy, s. 35–42.
- [7] Zhang L., Zhang Z., Li S., Cui H., Cui H.: *FE simulation and bending speed optimization of N-TR continuous grain flow forging process for solid heavy crankshaft*, *Obróbka Plastyczna Metali* t. XVII nr 2 (2006), s. 3–13.
- 18th International Forgemasters Meeting, 12–15 September 2011, Pittsburgh, USA, pp. 313–319.
- [5] Patent: China Patent Application No. 2005100013222.8 /CN 1836804 A/
- [6] Araki S., Ochi T., Fujita H., Hirano, Takahara H., *New Forging process for Continuous Grain Flow Crankshaft in Upsetting and Offsetting Operation*. Proceedings of the 11th International Forgemasters Meeting, June 1991, Terni, Italy, pp. 35–42.
- [7] Zhang L., Zhang Z., Li S., Cui H., Cui H.: *FE simulation and bending speed optimization of N-TR continuous grain flow forging process for solid heavy crankshaft*, *Obróbka Plastyczna Metali* vol. XVII no. 2 (2006), pp. 3–13.